



**Universidad Nacional
Autónoma de México**

**FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES
"CUAUTITLAN"**



V N A M

93
29

**PROPAGACION Y RADIACION
DE MICROONDAS**

TRABAJO DE SEMINARIO

QUE PARA OBTENER EL TITULO DE:
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA

P R E S E N T A :
ALFONSO ORTEGA VAZQUEZ

ASESOR: ING. ALFONSO CONTRERAS MARQUEZ

CUAUTITLAN IZCALLI, EDO. DE MEX.

1996

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**

**TESIS CON
FALLA DE ORIGEN**



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

FACULTAD DE ESTUDIOS SUPERIORES CUAUTITLÁN
UNIDAD DE LA ADMINISTRACIÓN ESCOLAR
DEPARTAMENTO DE EXÁMENES PROFESIONALES

U. N. A. M.
FACULTAD DE ESTUDIOS
SUPERIORES-CUAUTITLÁN



DEPARTAMENTO DE
EXÁMENES PROFESIONALES

DR. JAIME KELLER TORRES
DIRECTOR DE LA FES-CUAUTITLÁN
PRESENTE.

ATN: ING. RAFAEL RODRIGUEZ CEBALLOS

Jefe del Departamento de Exámenes
Profesionales de la FES-C.

Con base en el art. 51 del Reglamento de Exámenes Profesionales de la FES-Cuautitlán, nos permitimos comunicar a usted que revisamos el Trabajo de Seminario:

Comunicaciones
Propagación y Radiación de Microondas

que presenta el presente: Alfonso Ortega Vázquez
con número de cuenta: 7904095-0 para obtener el Título de:
Ingeniero Mecánico Electricista

Considerando que dicho trabajo reúne los requisitos necesarios para ser discutido en el EXÁMEN PROFESIONAL correspondiente, otorgamos nuestro VISTO BUENO.

ATENTAMENTE.

"POR MI RAZA HABLARA EL ESPIRITU"

Cuautitlán Izcalli, Edo. de México, a 23 de Febrero de 1966

MODULO:	PROFESOR:	FIRMA:
<u>Primero</u>	<u>Ing. Alfonso Contreras Márquez</u>	<u>Contreras Márquez Alfonso</u>
<u>Segundo</u>	<u>Ing. Juan González Vega</u>	<u>[Firma]</u>
<u>Cuarto</u>	<u>Ing. Joel Sánchez Pérez</u>	<u>[Firma]</u>

DEP/VORSEN

**A MIS PADRES: POR TODA SU AYUDA, COMPRENSION Y PACIENCIA EN MI FORMACION PROFESIONAL Y PERSONAL.
A TI MAMA EN ESPECIAL POR TODO TU CARIÑO Y PALABRAS DE CONSEJO Y ALIENTO, ¿SABES MAMI?... DIARIAMENTE TRABAJO PARA INTENTAR NO DEFRAUDARTE EN TODAS TUS ENSEÑANZAS.**

A MIS TIOS PRIMOS Y HERMANOS: POR COMPARTIR CONMIGO MOMENTOS IMPORTANTES A LO LARGO DE MI VIDA.

A MIS AMIGOS: POR TODA SU AYUDA Y AMISTAD EN ESTOS AÑOS DE FORMACION PROFESIONAL.

A TODAS LAS PERSONAS : QUE CON SU COMPAÑERISMO EN EL TRABAJO Y FUERA DE EL COOPERARON PARA LA PREPARACION DE ESTE TRABAJO Y EL EXAMEN PROFESIONAL.

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO E INSTITUCIONES QUE CON SU PROFESIONALISMO CONTRIBUYERON A MI FORMACION PROFESIONAL.

AL INGENIERO ALFONSO CONTRERAS MARQUEZ POR SU AYUDA Y DIRECCION EN LA ELABORACION DE ESTE TRABAJO.

¡ GRACIAS !

INVIERNO 1995-1996

INDICE

INTRODUCCION	4
--------------	---

CAPITULO 1

PROPAGACION

1.0 Factores a Considerarse en un Enlace	7
1.1 Refracción	7
1.2 Reflexión	13
1.3 Difracción	17
1.4 Zonas de Fresnel	18
1.5 Desvanecimiento	20
1.6 Características de los Lugares Asignados a las Estaciones Terminales o Relevadoras.	21
1.7 Método para Determinar la Trayectoria de Propagación, Considerando Piana la Superficie Terrestre	23
1.8 Metodo para Determinar la Trayectoria de Propagación Sobre la Superficie de una Tierra Ficticia Cuyo Radio es $4/3$ del Valor Real	24

CAPITULO 2

SISTEMA RADIADOR

2.0 Elemento Reflector	26
2.1 Principales Propiedades de un Reflector Parabólico	27
2.2 Sistema Radiador con Reflector Parabólico de Revolución	29
2.3 Región Cercana	29
2.4 Región Cilíndrica o de Fresnel	29

2.5	Región Cónica o de Fraunhofer	32
2.6	Trazo de un Patrón de Radiación Secundario	33
2.7	Angulo Equivalente del Haz	38
2.8	Ganancia	39
2.9	Eficiencia	41
2.10	Elemento Radiador	46

	GLOSARIO	53
	BIBLIOGRAFIA	55

INTRODUCCION

Las telecomunicaciones hacen posible la comunicación eléctrica ó digital a distancia. Este servicio lo proporciona una industria que depende de un gran cuerpo de ingenieros especializados. Estas telecomunicaciones pueden ser a través de dos diferentes formas de transmisión como son:

- Analógica
- Digital

En este documento hablaremos de la PROPAGACION y RADIACION de microondas a través del espacio de las consideraciones y cuidados que se deben tener en el diseño de cualquier red de microondas en los dos temas mencionados anteriormente.

En la actualidad la transmisión de la información via microondas ya sea de manera digital o analógica va a ser diferenciada por el tratamiento de la señal tanto en el equipo transmisor como en el receptor. Es decir cuando la señal de microondas esta viajando con la información digital ó analógica a través del espacio se deben de tener los mismos cuidados para cualquiera de las dos señales y esto es debido a que el medio en el cual viajan ambas microondas es el mismo.

Solo que en la transmisión analógica, la señal que transporta la información es continua y en la transmisión digital es discreta. La forma más simple de transmisión digital es la binaria en la cual a cada elemento de información se le asigna uno de dos posibles estados.

Se ha establecido todo un sistema de numeración en base a dos valores a los que, por convención se les asignan los simbolos 1 y 0. Este es el sistema binario cuya base es el 2.

Hasta hace apenas unos años, la gran mayoría de los sistemas de comunicaciones eran de naturaleza analógica; sin embargo, la comunicación de tipo digital ha venido cobrando una gran importancia por razones como son la demanda de comunicaciones de datos y el hecho de que la transmisión digital ofrece una flexibilidad para el procesamiento de datos muy superior a la transmisión analógica.

Cuando se habla de señales de banda base, se sabe que la forma de onda a que se está haciendo referencia son pulsos, mientras que en las señales moduladas o de banda ancha la información a transmitir modula una forma de onda senoidal llamada portadora, la cual es entonces transmitida a través del canal de comunicación.

La razón principal para modular una señal original de banda base se aprecia claramente si se considera por ejemplo que para su transmisión se va a utilizar la radiación electromagnética.

Otra razón de importancia por la cual se usa la modulación para la transmisión de señales es la de permitir multiplexar o agrupar varias señales diferentes a través del mismo canal de comunicación.

La modulación también es usada para cambiar la banda de frecuencia del espectro de una señal hacia otra banda donde sea más sencillo el filtraje o amplificación de la misma; la señal resultante se conoce como frecuencia intermedia o FI y es muy comúnmente usada en los radio receptores.

Los párrafos anteriores sólo han sido una breve descripción de la gran capacidad y versatilidad de las microondas como medios de transmisión y como se menciono anteriormente en este documento hablaremos de dos de los temas más importantes en la transmisión de las microondas como son su PROPAGACION Y RADIACION.

PROPAGACION

El desarrollo de un proyecto que permita obtener una comunicación segura y eficiente entre dos puntos, mediante un sistema de microondas, deberá satisfacer ampliamente los requisitos impuestos por las normas de operación.

También será necesario hacer un estudio de las condiciones topográficas y de propagación en la ruta propuesta, con objeto de obtener las condiciones óptimas de operación, ya que las pérdidas introducidas por estos factores, en contraste con las pérdidas y ganancias fijas del equipo empleado, representan variables a las que se debe prestar una atención especial.

1.0 FACTORES A CONSIDERARSE EN UN ENLACE

De acuerdo con las características del sistema radiador empleado en estos equipos, la energía transmitida en ondas electromagnéticas dentro de la banda de 500 a 10000 Mhz, se considera concentrada en un haz constituido por una familia de líneas conocidas con el nombre de rayos.

Se designa con el nombre de rayo a la línea que representa la trayectoria de propagación del flujo de energía transmitida; en un medio isotrópico los rayos serán perpendiculares a la familia de curvas que representan los frentes de onda.

Cuando el haz transmitido incide sobre una superficie que separa dos medios de diferente densidad ó de diferente conductividad, su trayectoria de propagación, puede resultar afectada por los fenómenos de REFRACCION, REFLEXION O DIFRACCION.

1.1 REFRACCION

El fenómeno de refracción se debe a los diferentes valores de densidad existentes en las capas atmosféricas. La variación de densidad, produce una disminución gradual en el valor del índice de refracción a medida que aumenta la altitud.

Según W. Snell, la velocidad de propagación en función del índice de refracción esta dada por la ecuación:

$$v = \frac{c}{\eta}$$

en donde: v = velocidad de propagación en el medio que se compara.
 c = velocidad de propagación en el vacío.
 η = índice de refracción del medio que se compara.

La disminución en el valor del índice de refracción da por resultado que la velocidad de propagación sea mayor en las capas superiores de la atmósfera y por lo tanto, la trayectoria del haz sufrirá una deflexión cuyo radio de curvatura será inversamente proporcional a la magnitud del gradiente de dicho índice.

El radio de curvatura mencionado, podrá ser determinado haciendo referencia a la figura 1.1, en donde $A - A'$ y $B - B'$ representan dos diferentes frentes de onda de un mismo haz y la curva $D - D'$ la trayectoria de uno de los rayos que lo constituyen. (1)

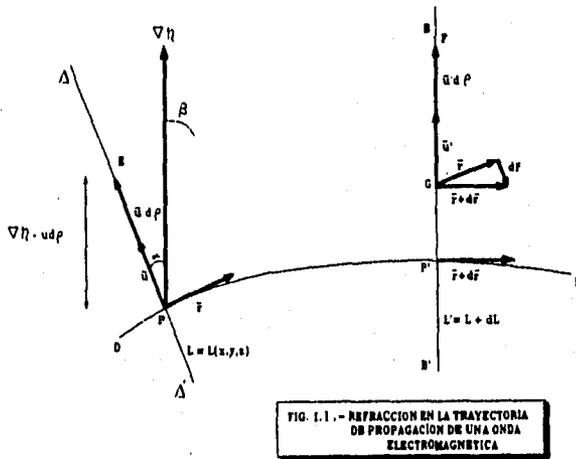


FIG. 1.1. - REFRACCION EN LA TRAYECTORIA DE PROPAGACION DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA

Considérese la superficie $A - A'$ como parte de un frente de onda determinado por la función $L_0 = L(x, y, z)$ en un instante de tiempo T_0 y el cual se propaga en un medio no homogéneo. Para un incremento de tiempo igual con dt , dicho frente de onda pasará a la posición $B - B'$ y será definido por la nueva función $L' = (L_0 + dL)$.

Si $|\vec{v}|$ representa la magnitud del valor de velocidad de propagación, el espacio recorrido en el tiempo dT será:

$$ds = |\vec{v}| dt$$

Por otra parte, siendo la fase en cualquier punto del frente de onda A-A' igual con $\frac{\omega}{c} L_0$, en B-B', esta se modificará a:

$$\frac{\omega}{c} (L_0 + dL) \text{ y la variación de fase correspondiente será: } \frac{\omega}{c} dL$$

Considerando la fase en cada punto del frente de onda como una función de ωt , para un incremento de tiempo dt la diferencia de fase entre A-A' y B-B' será:

$$\omega dt$$

por lo tanto

$$\omega dt = \frac{\omega}{c} dL = \frac{\omega}{v} ds$$

en donde

$$\frac{dL}{ds} = \frac{c}{v} = \eta$$

De acuerdo con la definición de gradiente, la variación de la función dL , en la dirección ds , será igual a la magnitud del gradiente de dicha función:

$$\frac{dL}{ds} = |\nabla L| = \eta$$

es decir, la variación de la función L en una dirección normal al frente de onda será proporcional al valor correspondiente al índice de refracción del medio.

Si el vector \vec{r} corresponde a un vector unitario normal al frente de onda, el valor del gradiente de la función será:

$$\nabla L = \vec{r} \eta = \vec{r} \frac{dL}{ds}$$

Este vector \vec{r} representa también la dirección del rayo D-D' en el punto P del frente de onda A-A'.

Cuando el frente de onda A-A', se desplaza a la posición B-B', el vector \vec{r} cambia a $\vec{r} + d\vec{r}$, por lo tanto, para determinar el efecto que sobre la trayectoria del rayo producen los diferentes valores del índice de refracción η , será necesario conocer la dirección del vector $\vec{r} + d\vec{r}$ y la magnitud del vector $\frac{d\vec{r}}{ds}$

a.- DETERMINACION DEL VECTOR $\vec{r} + d\vec{r}$

Considerando dos vectores unitarios \vec{u} y \vec{v} que satisfacen las siguientes condiciones:

$$\begin{aligned} \vec{r} \cdot \vec{u} &= 0 \\ \vec{r} \times \vec{u} &= \vec{v} \end{aligned}$$

y siendo ρ el radio de curvatura en el punto P, la variación en el valor del índice de refracción entre los puntos P y E será:

$$\nabla \eta \cdot \vec{u} \, d\rho \approx \vec{u} \, d\rho$$

dado que el ángulo de elevación α entre los vectores \vec{u} y $\nabla \eta$ es pequeño, por considerarse que la utilización del haz queda confinada exclusivamente a las capas inferiores de la atmósfera.

El valor del índice de refracción en el punto E

$$\eta + \nabla \eta \cdot \vec{u} \, d\rho$$

El vector posición correspondiente al punto P', tomando como origen el punto P será:

$$\vec{r} \, ds = \vec{r} \frac{dL}{\eta}$$

El vector posición para el punto F tomando como referencia el punto E:

$$\vec{r} \frac{dL}{\eta - \nabla \eta \cdot \vec{u} \, d\rho} = \vec{r} \frac{dL}{\eta} \frac{1}{(1 - \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u} \, d\rho}{\eta})}$$

El vector $\vec{P} \vec{F}$ es igual a la suma de los vectores $\vec{P} \vec{E}$ y $\vec{E} \vec{F}$, por lo tanto:

$$\vec{P} \vec{F} = \vec{u} \, d\rho + \vec{r} \, ds + \vec{r} \left(\frac{\nabla \eta \cdot \vec{u} \, ds}{\eta} \right) d\rho$$

El vector $\vec{G} \vec{F}$ de acuerdo con la figura de referencia será:

$$\begin{aligned} \vec{G} \vec{F} &= \vec{P} \vec{F} - \vec{P} \vec{G} = \vec{u} \, d\rho + \vec{r} \, ds + \vec{r} \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u} \, ds}{\eta} d\rho - \vec{r} \, ds = \\ &= d\rho \left(\vec{u} + \vec{r} \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u} \, ds}{\eta} \right) \end{aligned}$$

El vector $\vec{r} + d\vec{r}$ será normal al frente de onda $B-B'$ ya que representa la dirección de propagación del rayo en el punto P' , por lo cual deberá considerarse como:

$$\begin{aligned} \vec{r} + d\vec{r} &= (\vec{u} + \vec{r} \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u}}{\eta} ds) \times \vec{v} = \\ &= \vec{u} \times \vec{v} + \vec{r} \times \vec{v} \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u}}{\eta} ds = \\ &= \vec{r} \cdot \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u}}{\eta} ds \end{aligned}$$

b. DETERMINACION DE LA MAGNITUD DEL VECTOR $\frac{d\vec{r}}{ds}$

De la expresión anterior se puede obtener la siguiente:

$$\frac{d\vec{r}}{ds} = -\vec{u} \frac{\nabla \eta \cdot \vec{u}}{\eta}$$

Según se indica en la figura 1.2 el vector $\frac{d\vec{r}}{ds}$ representa un vector que determina la

curvatura del rayo en el punto P . \vec{R} corresponde al radio vector de curvatura para el mismo punto y $\vec{R} + \Delta \vec{R}$ el radio vector de curvatura para el punto P' en la misma trayectoria; el vector $\Delta \vec{R}$ es la cuerda del arco $P-P'$ y cuando Δs tiende hacia cero, se obtendrá:

$$\lim_{\Delta s \rightarrow 0} \left| \frac{\Delta \vec{R}}{\Delta s} \right| = \frac{d\vec{r}}{ds}$$

Este vector será tangente a la trayectoria en el punto P y tendrá la dirección de los vectores que representan el rayo y la velocidad de propagación de la onda.

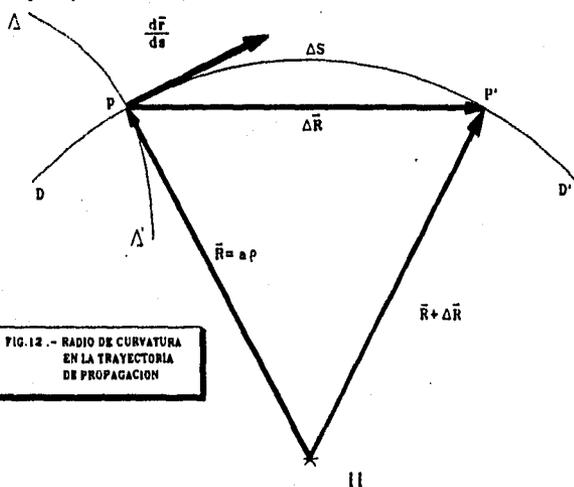


FIG. 12. - RADIO DE CURVATURA EN LA TRAYECTORIA DE PROPAGACION

Por lo tanto la magnitud del vector $\frac{d\vec{r}}{ds}$ será:

$$\left| \frac{d\vec{r}}{ds} \right| = \frac{|\nabla\eta| \cos\beta}{\eta}$$

Substituyendo los valores $\eta \cong l$ y $\cos\beta \cong 1$ se obtiene:

$$\left| \frac{d\vec{r}}{ds} \right| \cong |\nabla\eta|$$

Teniendo en cuenta que el radio de curvatura se define como:

$$\frac{l}{\rho} = \left| \frac{d\vec{r}}{ds} \right|$$

es posible determinar que:

$$\left| \frac{d\vec{r}}{ds} \right| = \frac{l}{\rho} = |\nabla\eta| = \left| \nabla \frac{c}{v} \right| = \left| \nabla \frac{ck}{2\pi f} \right|$$

es decir, el radio de curvatura del rayo será inversamente proporcional a la magnitud del gradiente correspondiente al índice de refracción del medio de propagación. (2)

Dado que el índice de refracción decrece uniformemente con la altura de las capas atmosféricas, se considera que el valor de $\nabla\eta$ es constante y las trayectorias de los rayos que constituyen el haz formarán aproximadamente arcos de círculo, dirigidos hacia la superficie de la tierra según se ilustra en la figura 1.3

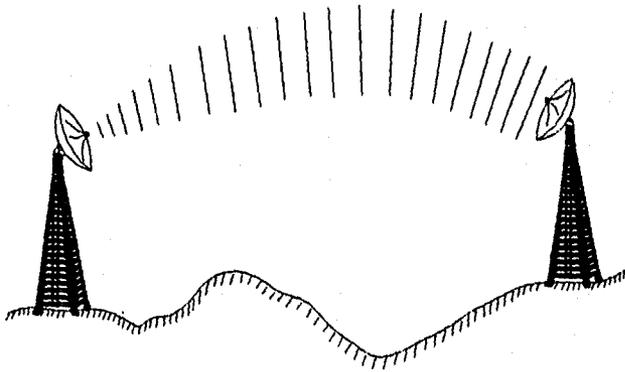


FIG. 1.3. - FENOMENO DE REFRACCION

Para facilitar la representación de la trayectoria de propagación y el cálculo de intensidad de la señal, se puede considerar una atmósfera de índice de refracción constante (atmósfera normal), asociada a la superficie de una tierra ficticia, cuyo radio corresponde a 4/3 del radio real. Siendo constante el valor del índice de refracción, su gradiente será igual con cero y el radio de curvatura resultará infinito, es decir, el rayo podrá ser representado por una línea recta.

El radio real de la tierra es aproximadamente de 6370 Km y el correspondiente a la tierra ficticia de 8490 Km.

1.2 REFLEXION

El fenómeno de reflexión se manifiesta cuando los rayos que constituyen el haz, inciden sobre la superficie de un medio cuya conductividad difiere de la correspondiente al medio en el cual se propaga.

Bajo ciertas condiciones y para el caso especial en donde la onda transmitida sea polarizada horizontalmente, el campo eléctrico reflejado estará 180° fuera de fase con respecto al campo eléctrico incidente. Cuando la onda incidente se encuentra polarizada verticalmente, la diferencia de fase entre los campos eléctricos incidente y reflejado variará entre 0° y 180° , dependiendo del valor correspondiente al ángulo de incidencia.

Las figuras 1.4 y 1.5 representan el efecto que sobre una onda electromagnética se obtiene bajo las condiciones antes mencionadas.

FIG. 14.- REFLEXION DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA POLARIZADA HORIZONTALMENTE

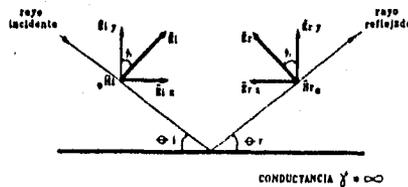
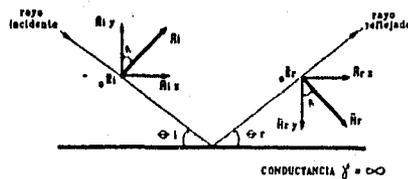


FIG. 15.- REFLEXION DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA POLARIZADA VERTICALMENTE

La reflexión será total si el haz incide sobre la superficie de un conductor perfecto, disminuyendo a medida que la conductividad del material reflector tiende hacia cero, dado que la penetración del campo eléctrico es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del valor de dicha conductividad.

Considérese una onda electromagnética polarizada en la dirección del eje x , incidiendo normalmente a la superficie x , y de un material de conductividad infinita. La ecuación representativa será: (3)

$$E_{xi} = E_m R_e e^{j(\omega t - kz)}$$

Siendo la velocidad de propagación:

$$v = \frac{\omega}{k}$$

La ecuación anterior puede escribirse:

$$E_{xi} = E_m R_e e^{jk(vt - z)}$$

La onda reflejada deberá propagarse en dirección opuesta a la incidente y se representará por la función:

$$E_{xr} = f [k (vt + z)]$$

El campo eléctrico total será:

$$E_x = E_{xi} + E_{xr} = E_m R_e e^{jk(vt - z)} + f [k (vt + z)]$$

En la superficie del conductor, $z = 0$, y la ecuación tomará la forma siguiente:

$$E_x = E_m R_e e^{j\omega t} + f(kvt)$$

Siendo la conductividad del material infinita, el campo eléctrico total en este punto, será nulo y por lo tanto:

$$E_{xi} = - E_{xr}$$

es decir:

$$E_m R_e e^{j\omega t} = - f(k v t)$$

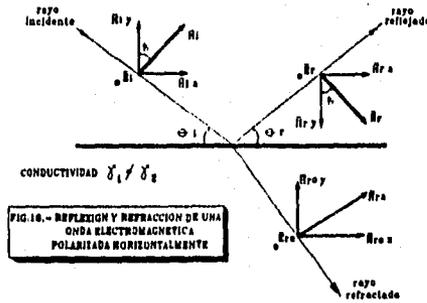
la ecuación general para cualquier punto en el eje Z será:

$$E_x = E_m R_e e^{jk(vt - z)} - E_m R_e e^{jk(vt + z)}$$

De las ecuaciones anteriores se deduce que para este caso especial, el campo eléctrico de la onda reflejada estará 180° fuera de fase con respecto al incidente, dicha propiedad corresponde muy aproximadamente a los materiales de alta conductividad y permite su empleo para la construcción de elementos reflectores, en sistemas radiadores de gran directividad.

Cuando el material reflector corresponde a un conductor pobre, tal como la superficie de la tierra, parte de la energía de la onda será refractada según se muestra en la figura 1.6 , introduciéndose en esta forma atenuación entre la onda incidente y la reflejada. Dicha atenuación será inayor ó menor, dependiendo del grado de conductividad encontrado en la superficie reflectora, su valor se podrá determinar en función del Coeficiente de Reflexión del material reflector, el cual relaciona el valor del campo eléctrico incidente con el valor del campo eléctrico reflejado en la siguiente forma:

$$\Gamma = \frac{E_i}{E_r} = \frac{P_i}{P_r}$$



En cualquiera de los casos mencionados anteriormente, la onda reflejada y la incidente se propagarán en el mismo medio y por lo tanto sus longitudes de onda serán iguales. (4)

$$\lambda_i = \lambda_r$$

$$v_i = \frac{\omega}{\beta_i} \quad \text{y} \quad \beta_i = \frac{2\pi}{\lambda_i}$$

$$v_r = \frac{\omega}{\beta_r} \quad \text{y} \quad \beta_r = \frac{2\pi}{\lambda_r}$$

$$\therefore \lambda_i = \lambda_r$$

Refiriéndose a la figura 1.7, se puede deducir que las distancias ab y bc entre las crestas positivas de la onda incidente y reflejada, expresadas en función de los ángulos de incidencia y reflexión, están dadas por las expresiones:

$$ab = \frac{\lambda_i}{\cos \theta_i} \quad \text{onda incidente}$$

$$bc = \frac{\lambda_r}{\cos \theta_r} \quad \text{onda reflejada}$$

siendo

$$ab = bc$$

y

$$\lambda_i = \lambda_r$$

$$\cos \theta_i = \cos \theta_r$$

de donde:

$$\theta_i = \theta_r$$

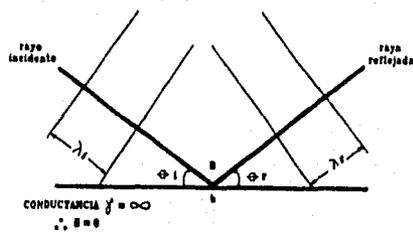


FIG. 1.7.-REFLEXION DE UNA ONDA ELECTROMAGNETICA SOBRE UNA SUPERFICIE DE CONDUCTIVIDAD INFINITA.

El ángulo de reflexión será igual al ángulo de incidencia, independientemente de la naturaleza del material reflector.

1.3 DIFRACCION

Se denomina como difracción de una onda electromagnética, al doblez sufrido por su trayectoria, cuando un obstáculo la intercepta parcialmente.

Este fenómeno, se explica basándose en el principio de Huygens - Fresnel, el cual enuncia que cada punto de un frente de onda es una fuente que produce un campo elemental.

Por lo tanto, los puntos correspondientes al frente de onda que llegan a la superficie del obstáculo, irradian energía en todas direcciones, como centros elementales de radiación, modificando la distribución de energía del frente de onda original, según se muestra en la figura 1.8.

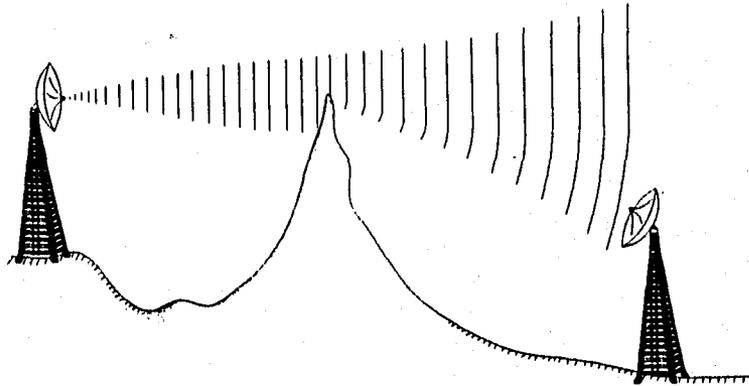


FIG. 1.8.- FENOMENO DE DIFRACCION

Refiriéndose al caso especial ilustrado en la figura mencionada, y en la cual el obstáculo intercepta la mitad del frente de onda, la potencia que llega a la antena receptora se reduce a la cuarta parte del valor normal que se obtendría en el espacio libre, ya que el valor de la intensidad de campo resulta atenuado 6 db. Este valor de atenuación se determina en la figura 1.9, donde se muestra el efecto que un obstáculo produce sobre la intensidad de campo. (5)

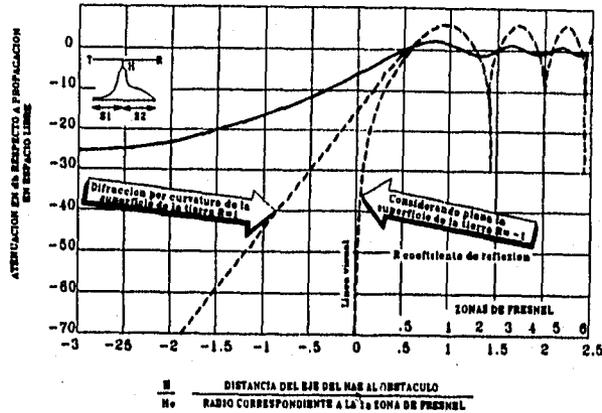


FIG. 1.9.- EFECTO QUE UN OBSTÁCULO INTRODUCE EN LA TRAYECTORIA DE PROPAGACIÓN

En esta figura se observa también, que si la distancia H , entre el eje del haz y el obstáculo aumenta, la atenuación en la trayectoria disminuye hasta coincidir con la de espacio libre cuando el valor de H es 0.6 del radio en la primera zona de Fresnel.

Con objeto de obtener condiciones similares de propagación a las existentes en el espacio libre, deberá reducirse al mínimo el efecto que los fenómenos de reflexión y refracción introducen en la propagación del haz, localizando los puntos transmisor y receptor de tal manera que exista una visibilidad completa entre ellos y además, que la distancia entre el eje del haz y cualquier obstáculo sea mayor que el radio correspondiente a la primera zona de Fresnel en ese punto.

1.4 ZONAS DE FRESNEL

Considerando un frente de onda en cualquier punto de la trayectoria entre los lugares transmisor y receptor, tal como se muestra en la figura 1.10, se observa que está dividido en varias zonas bien definidas, conocidas con el nombre de Fresnel. Los puntos del frente de onda agrupadas en cada zona, difieren en su trayectoria desde el punto transmisor en media longitud de onda con respecto a los puntos comprendidos en zonas adyacentes.

La superficie que limita a la llamada primera zona de Fresnel, es una elipse de revolución y corresponde al lugar geométrico de todas las trayectorias posibles entre los puntos transmisor y receptor, cuya longitud total excede en media longitud de onda a la distancia en línea recta entre dichos puntos, los cuales se consideran como puntos focales de la elipse mencionada.

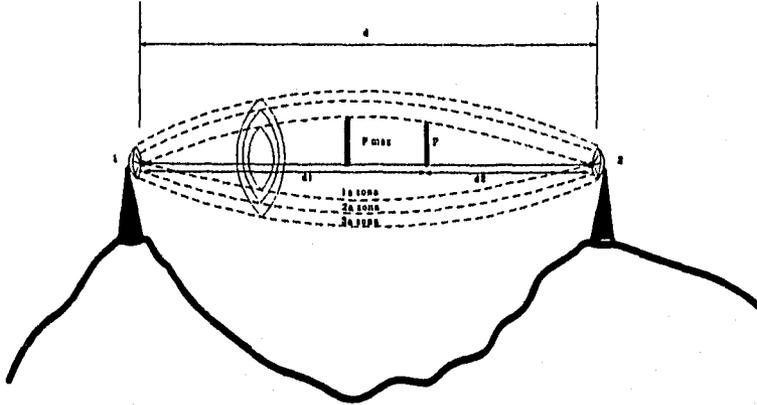


FIG. 1.10.- ZONAS DE FRESNEL

La segunda zona de Fresnel, está limitada en igual forma que la anterior por un elipse de revolución, la cual corresponde al lugar geométrico de las trayectorias posibles, cuya longitud total excede en una longitud de onda a la distancia en línea recta entre los puntos transmisor y receptor.

Las zonas sucesivas siguen la misma ley de distribución.

La región correspondiente a la primera zona de Fresnel es la más importante para el desarrollo de un proyecto, ya que en ella se considera concentrada la mayor parte de la energía transmitida. Cuando la superficie reflectora se encuentra a una distancia H del eje del haz igual al radio de la primera zona de Fresnel, la onda reflejada llegará en fase con la onda directa al punto receptor, y por lo tanto se obtendrá una ganancia adicional en la trayectoria según se representa en la figura 1.9. Cuando la distancia H es igual al radio de la segunda zona de Fresnel, la onda reflejada llegará 180° fuera de fase con respecto a la onda directa y esta sufrirá una cancelación parcial según la figura 1.9.

La siguiente fórmula, permite determinar las diferentes distancias entre el eje mayor y la superficie de la elipse que limita a la primera zona de Fresnel.

$$P = \sqrt{\frac{\lambda \cdot d_1 \cdot d_2}{d_1 + d_2}}$$

en donde

- P Distancia entre el eje mayor de la elipse y su superficie, en las mismas unidades que d_1 , d_2 y λ
- d_1 Distancia al punto focal 1
- d_2 Distancia al punto focal 2
- λ Longitud de onda de la frecuencia utilizada

Para el caso especial en donde $d_1 = d_2$

$$P_{\max} = \sqrt{\frac{\lambda d_1}{2}}$$

considerando que:

$$d = d_1 + d_2 = 2 d_1$$

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d}$$

1.5 DESVANECIMIENTO

En los párrafos anteriores se determinó que si las ondas electromagnéticas se propagan en una atmósfera normal, su trayectoria será una línea recta. Esta condición se obtiene ocasionalmente en la Tropósfera cuando se presentan los siguientes fenómenos:

- a) Corrientes de convección
- b) Tormentas
- c) Masas de aire frío recorriendo superficies calientes de la tierra

Normalmente, el radio de curvatura correspondiente a la trayectoria de propagación, es inversamente proporcional al valor absoluto del gradiente del índice de refracción, el cual depende de la temperatura, presión y contenido de vapor de agua en la atmósfera.

Cuando por alguna circunstancia, el valor de estos factores se altera, el índice de refracción se modifica y se produce como consecuencia una variación en el radio de curvatura de la trayectoria, desviándose del punto receptor y afectando grandemente el nivel de señal obtenido, dando origen al fenómeno conocido como DESVANECIMIENTO.

El valor del índice de refracción puede ser modificado por varias causas, siendo la principal, la conocida como Inversión de Temperatura. Se designa con este nombre a cualquier cambio que sufra la relación de variación de temperatura, con respecto a la altura, en las capas atmosféricas, la cual corresponde normalmente a 1.65°C por cada 300 metros de elevación.

De acuerdo con la causa que produce dicha inversión de temperatura, esta puede ser:

DINAMICA: Cuando es producida por una masa de aire caliente rodeada de aire frío ó inversamente, una masa de aire frío rodeada por aire caliente.

SUBSIDENCIA: Producida por el hundimiento que por compresión sufre una masa de aire caliente.

NOCTURNAL: Producida por el enfriamiento rápido de las masas de aire, después de la puesta de Sol.

La inversión de temperatura también puede ser producida por sobrecalentamiento del aire situado arriba de una capa de nubes, al reflejarse en su superficie los rayos del Sol.

Las causas que afectan el cambio de humedad en la atmósfera, tales como lluvia, nieve ó neblina, introducen variaciones en el valor del índice de refracción, además de atenuación adicional por absorción y dispersión.

Para frecuencias mayores a 10,000 Mhertz, las partículas de agua, que constituyen la lluvia, actúan como pequeños dipolos que absorben la energía del campo eléctrico y lo transforman en calor.

1.6 CARACTERISTICAS DE LOS LUGARES ASIGNADOS A LAS ESTACIONES TERMINALES O RELEVADORAS

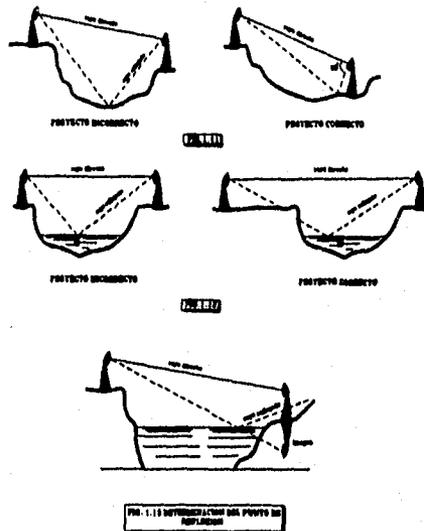
De acuerdo con las consideraciones mencionadas anteriormente, la propagación del haz entre los puntos transmisor y receptor será afectada grandemente por el perfil topográfico entre dichos puntos ya que no siempre existirá visibilidad completa entre ellos.

La selección del lugar apropiado para la construcción de una estación terminal ó relevadora, deberá satisfacer los siguientes requisitos topográficos basados en las anteriores consideraciones sobre propagación:

1.- Para evitar el efecto que sobre la intensidad de campo pudiera producir un obstáculo que intercepte la línea visual entre los puntos transmisor y receptor, debido al fenómeno de difracción, se deberán escoger lugares entre los cuales exista una visibilidad completa.

2.- Se deberán evitar lugares entre los cuales la trayectoria incida total ó parcialmente sobre una superficie lisa de grandes dimensiones, tales como un lago, el mar ó un terreno uniforme ya que estas superficies actuarían como reflectoras. En este caso sería necesario determinar la diferencia de fase entre las trayectorias directa y reflejada, así como la clase de terreno en donde se efectúan la reflexión y el tipo de polarización empleado, con objeto de determinar el efecto que tales reflexiones pudiesen producir en el valor de intensidad de campo recibida en la antena de la estación receptora.

Cuando no sea posible evitar estas superficies, se buscará la manera de obstruir el rayo reflejado para anular su influencia. En las figuras 1.11 y 1.12 se presentan varias maneras de obstruir ó interceptar dicho rayo reflejado. En la figura 1.13 se representa un método para determinar un posible punto de reflexión. (6)



3.- Con objeto de evitar las pérdidas que por absorción ó dispersión pudiera introducir un terreno de configuración escabrosa, ó reflexiones que afecten el nivel de señal en la antena receptora, el eje del haz deberá pasar a una distancia tal de cualquier obstáculo que permita considerar libre la primera zona de Fresnel.

4.- La distancia máxima permitida entre dos puntos de relevo, prácticamente está limitada por las condiciones de desvanecimiento de la señal y no por la atenuación ó factor de propagación de espacio libre.

5.- Los lugares que se asignen para instalar estaciones de relevo, deberán encontrarse en puntos accesibles, cercanos a vías de comunicación y líneas de transmisión de energía. Además el número de estaciones repetidoras para un enlace debe ser mínimo, ya que el costo de inversión aumenta considerablemente con cada una de ellas.

Para efectuar el estudio que permita determinar si la trayectoria entre dos puntos se encuentra libre de interferencia, será necesario trazar sobre una gráfica dicha trayectoria, así como el perfil topográfico correspondiente.

Existen dos métodos para hacer tal representación, los cuales se describen a continuación.

1.7 METODO PARA DETERMINAR LA TRAYECTORIA DE PROPAGACION, CONSIDERANDO PLANA LA SUPERFICIE TERRESTRE

En este tipo de representación, se deberá dibujar el perfil topográfico actual entre los puntos transmisor y receptor, tomando como base una línea recta que representará la superficie terrestre, las altitudes correspondientes a cada punto del perfil se determinarán del trazo que sobre una Carta Geográfica de la región se haga de la ruta propuesta.

Una vez determinado el perfil topográfico, se procederá a trazar la trayectoria de propagación teniendo en cuenta las siguientes consideraciones:

Suponiendo que las ondas electromagnéticas que constituyen el haz, se propagan en una atmósfera normal, su trayectoria será una línea recta como se muestra en la figura 1.14 por la recta AB y en donde h_1 representa la altura del punto A, h_2 la correspondiente al punto B y el arco EF la superficie ficticia de la tierra ($\frac{4}{3}$ del radio actual). Pero, si la superficie terrestre se considera plana, la trayectoria de propagación se representará como una curva según la figura 1.15, cuya desviación vertical en cualquier punto será: (7)

$$PQ = \frac{d_1 d_2}{2 r'}$$

- PQ = Desviación de la trayectoria
- d_1 y d_2 = Distancia entre el punto considerado y A ó B
- r' = Radio de la tierra ficticia

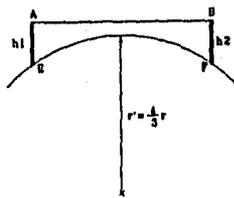


FIG. 1.14

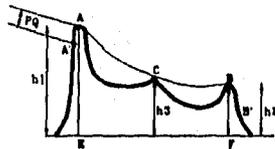


FIG. 1.15

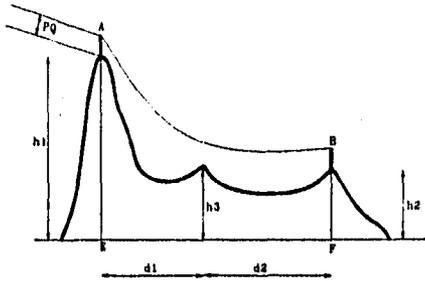


FIG. 1.16

TRAYECTORIA DE PROPAGACION CONSIDERANDO PLANA LA SUPERFICIE TERRESTRE

La desviación será máxima cuando d_1 igual con d_2

$$PQ_{\max} = \frac{d_1^2}{2r} = \frac{d^2}{8r}$$

En donde d es igual con $d_1 + d_2$

Partiendo de estas consideraciones, para trazar la trayectoria de propagación, se deberá trazar una línea recta AB entre los puntos transmisor y receptor y otra paralela A'B' con una separación igual a la máxima desviación PQ de acuerdo con la figura 1.15

La curva ACB representa la trayectoria de propagación, los puntos tales como C que interfiere dicha curva se considerarán como obstáculos y será necesario, por lo tanto, aumentar la altura de las torres según se muestra en la figura 1.16, con objeto de obtener una trayectoria libre de obstáculos.

1.8 METODO PARA DETERMINAR LA TRAYECTORIA DE PROPAGACION SOBRE LA SUPERFICIE DE UNA TIERRA FICTICIA CUYO RADIO ES 4/3 DEL VALOR REAL

Este método corresponde a un procedimiento más directo y consiste en trazar el perfil topográfico entre los puntos transmisor y receptor sobre un sistema de ejes, de los cuales el horizontal representa la superficie ficticia de la tierra y el eje vertical corresponde a las altitudes de los diferentes puntos de la trayectoria.

La trayectoria de propagación se presenta en esta gráfica por una línea recta, ya que se supone que se transmite en una atmósfera normal, refiriéndose todos sus puntos a la superficie de una tierra ficticia.

Para la representación del perfil topográfico se tomarán datos correspondientes a la ruta propuesta, en una Carta Geográfica, en forma similar a la indicada en el primer método, y se trazará a continuación una línea recta entre los puntos transmisor y receptor, la cual representará la trayectoria del haz. Si esta línea pasa cerca de un obstáculo, se determinará el valor del radio correspondiente a la primera zona de Fresnel en ese punto, para saber si se satisfacen los requisitos mencionados anteriormente. Si la distancia H entre el eje del haz y el obstáculo, es menor que el valor del radio en la primera zona de Fresnel se deberá aumentar la altura de las antenas, con objeto de mejorar esta condición, pero de no ser posible, se deberán buscar otras rutas que satisfagan las condiciones para la propagación del haz.

Este método de representación permite la aplicación directa de las ecuaciones que determinan la superficie límite de la primera zona de Fresnel, facilitando la representación y verificación si dicha zona se encuentra libre de obstáculos.

SISTEMA RADIADOR

Uno de los principales factores, que deberá tomarse en cuenta, para obtener máxima eficiencia en la operación de un equipo de Microondas, es el tipo de antena. Esta será de características tales que permita concentrar la mayor parte de la energía transmitida en un haz, cuyo ángulo de apertura sea menor de 15° . Dicha antena consta de un elemento radiador y un reflector, su directividad está determinada por la configuración de este último y por la iluminación que recibe del campo primario.

Con objeto de utilizar una sola antena en transmisión y recepción simultáneas, el valor de su impedancia deberá permanecer casi constante en un ancho de banda del orden de 20% de la frecuencia media.

2.0 ELEMENTO REFLECTOR

El tipo de elemento reflector comúnmente utilizado en estos sistemas es el de perfil parabólico, que construido con una abertura con diámetro de varias longitudes de onda, permite obtener una gran directividad. Mediante ligeras variaciones en la posición del elemento radiador con respecto al punto focal del reflector, es posible satisfacer un compromiso entre la máxima transferencia de energía y el ancho de banda.

En las figuras 2.1, 2.2, y 2.3, se muestran algunas formas de reflectores, correspondientes a un paraboloide de revolución, un paraboloide cilíndrico y una sección de paraboloide respectivamente.



FIG. 2.1.- PARABOLOIDE DE REVOLUCION

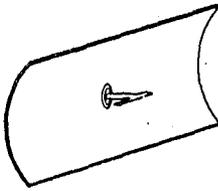


FIG. 2.2.- PARABOLOIDE CILINDRICO

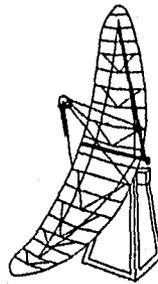


FIG. 2.3.- SECCION DE PARABOLOIDE

2.1 PRINCIPALES PROPIEDADES DE UN REFLECTOR PARABOLICO

Las propiedades de un reflector parabólico, pueden ser analizadas según los principios de la óptica geométrica, como sigue:

1.- La distancia recorrida por cualquier rayo reflejado en la superficie de la parábola, desde punto focal hasta el plano de la abertura, será independiente de la trayectoria y cada plano normal al eje de la parábola representará un frente de onda plano.

2.- Cuaquier rayo que parta del punto focal será reflejado en dirección paralela al eje de la parábola.

El primer principio puede demostrarse facilmente haciendo referencia a la figura 2.4 en donde S representa la superficie del reflector parabólico, F su punto focal y la recta $\Delta \Delta'$ su directriz.

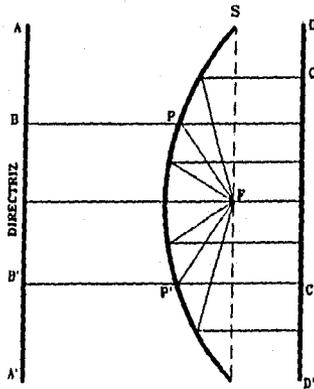


FIG. 2.4

Para cualquier punto P sobre la parábola tendremos: (1)

$$\overline{PF} = \overline{PB}$$

Siendo DD' un plano normal al eje de la parábola, situado a una distancia BC de la directriz se obtendrá:

$$PC = BC - PB$$

$$\overline{PF} + \overline{PC} = \overline{PB} + \overline{BC} - \overline{PB} = \overline{BC}$$

por lo tanto cualquier trayectoria $\overline{PF} + \overline{PC}$, será constante e igual con \overline{BC} .

El segundo principio se demuestra en la figura 2.5, en la que S representa la superficie parabólica, la recta EE' es una tangente a la parábola en el punto P y PP' es una recta normal a EE' en ese mismo punto.

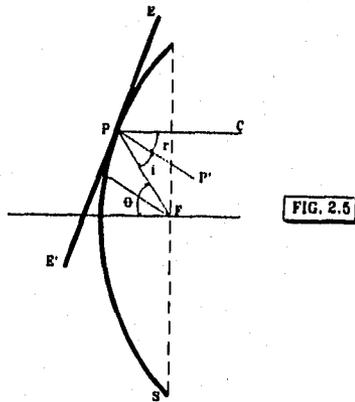


FIG. 2.5

PROPIEDADES DE UN REFLECTOR PARABOLICO

Cualquier rayo que provenga del punto focal P , formará un ángulo de incidencia \hat{i} con la normal PP' y el rayo reflejado PC formará con la normal PP' un ángulo \hat{r} igual al de incidencia.

En la figura mencionada el ángulo \hat{r} será igual a $\frac{\hat{\theta}}{2}$, por ser alternos internos, y por lo tanto:

$$\hat{\theta} = \hat{i} + \hat{r}$$

en consecuencia, la trayectoria PC será paralela al eje de la parábola.

Lo establecido anteriormente, permite comprender como un reflector parabólico de revolución, transforma una onda esférica en onda plana, y por otra parte un reflector parabólico cilíndrico transforma una onda cilíndrica en onda plana.

2.2 SISTEMA RADIADOR CON REFLECTOR PARABOLICO DE REVOLUCION

El patrón secundario de radiación para éste tipo de antena, depende de la distribución del campo de difracción determinado por la amplitud y fase del campo en el plano de abertura.

El campo de difracción se divide para su estudio en tres regiones denominadas:

- 1.- Región Cercana
- 2.- Región Cilíndrica ó de Fresnel
- 3.- Región Cónica ó de Fraunhofer

2.3 REGION CERCANA

El campo correspondiente a la región cercana, tiene una distribución compleja y se extiende solamente unas cuantas longitudes de onda más allá de la abertura, variando su intensidad en función inversa al cubo de la distancia.

2.4 REGION CILINDRICA O DE FRESNEL

El campo correspondiente a la región cilíndrica, llamada también de Fresnel por la similitud que presenta con las leyes de Fresnel en óptica, se propaga como un haz de sección constante. A medida que la onda se aleja de la abertura, su amplitud varía según se indica en la figura 2.6

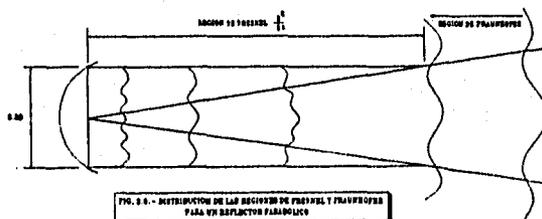


FIG. 2.4. - DISTRIBUCION DE LAS REGIONES DE FRESNEL Y FRAUNHOFER PARA UN REFLECTOR PARABOLICO

Este campo se extiende hasta una distancia aproximada

$$r \cong \frac{D^2}{2\lambda}$$

donde:

- D es el diámetro del plano de abertura.
- λ es la longitud de onda de la frecuencia de operación.

Una propiedad de esta región se aprovecha cuando se desea eliminar la atenuación que introduciría una línea de transmisión.

Cuando se utiliza una línea larga para conectar la antena parabólica a un transmisor, la atenuación introducida puede ser considerable. Para reducirla, se acostumbra colocar la parábola próxima al transmisor enfocando la energía radiada hacia un reflector plano, capaz de desviar el haz en la dirección deseada. Si el reflector queda situado dentro de la región de Fresnel podrán obtenerse eficiencias hasta de 99%. La figura 2.7 ilustra lo anterior.

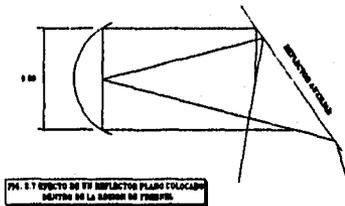


FIG. 2.7 EFECTO DE UN REFLECTOR PLANO COLOCADO DENTRO DE LA ZONA DE FRESNEL.

Para una antena parabólica con un diámetro de 3 m, operando en la banda de 2000 Mhz, la distancia máxima a la cual es posible colocar el reflector auxiliar dentro de la región de Fresnel, será aproximadamente de 30 m.

El valor del campo radiado, en esta zona, producido por una distribución de amplitud $F(x,y)$ en el campo de abertura, puede determinarse a partir de la expresión general del campo de difracción y de acuerdo con la figura 2.8

$$E_d = \frac{1}{4\pi} \iint F(x,y) \frac{e^{-jkr}}{r} \left[\left(jk + \frac{1}{r} \right) \bar{i}_z \cdot \bar{r} + jk \bar{i}_z \cdot \bar{s} \right] dx dy$$

donde:

- E_d Campo de difracción
 $F(x,y)$ Función que representa la distribución de amplitud en el plano de abertura.
 x,y Coordenadas de un punto P en el plano de abertura.
 x',y',z' Coordenadas de un punto P' en el campo de difracción.
 k Constante de propagación.
 r Magnitud de la distancia entre los puntos $P - P'$
 \vec{r} Vector unitario en la dirección y sentido del punto P al P'
 \vec{s} Vector unitario en la dirección y sentido de propagación del campo en el plano de abertura.
 \vec{i}_z Vector unitario en la dirección y sentido positivo del eje Z
 e^{jkr} Función escalar de retardación.

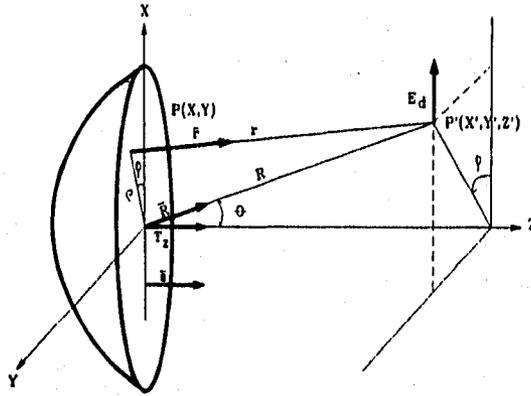


FIG.2.8.- ESQUEMA PARA DETERMINAR EL CAMPO DE DIFRACCIÓN DE UN PARABOLOIDE

en esta expresión se satisfacen los siguientes puntos:

- 1.- El valor de r es de varias longitudes de onda en esta región, por lo que $\frac{1}{r} \ll k$
- 2.- El radio del plano de abertura es pequeño comparado con el valor de r y por lo tanto,

$$\vec{i}_z \cdot \vec{r} \text{ es igual a } \vec{i}_z \cdot \vec{R} = \cos \theta$$

- 3.- El valor de la constante de propagación k esta dado por la expresión.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

sustituyendo estas tres relaciones en la expresión de E_d

$$E_d = \frac{j}{2\lambda R} \iint F(x, y) e^{-jk r} (\cos\theta + \bar{i}_z \cdot \bar{s}) \, dx \, dy$$

El valor de la distancia r es:

$$r = [(x' - x)^2 + (y' - y)^2 + z'^2]^{1/2}$$

y las coordenadas esféricas para el punto P' :

$$\begin{aligned} x' &= R \sin \theta \cos \varphi = R \alpha \\ y' &= R \sin \theta \sin \varphi = R \beta \\ z' &= R \cos \theta \end{aligned}$$

sustituyendo estos valores en la expresión de la distancia r y despreciando los términos de orden superior al segundo:

$$r \cong R - (\alpha x' + \beta y') + \frac{x'^2 + y'^2 - (\alpha x' + \beta y')^2}{2R} = R + r_b$$

Por lo tanto, la expresión del campo de difracción puede reducirse, en esta región, a la siguiente:

$$E_d = \frac{j}{2\lambda R} e^{-jkR} \iint F(x, y) e^{-jkr_b} (\cos\theta + \bar{i}_z \cdot \bar{s}) \, dx \, dy$$

2.5 REGION CONICA O DE FRAUNHOFER

Si la distancia al plano de abertura tiene un valor mayor que $\frac{D^2}{2\lambda}$, se llega a la región

cónica ó de Fraunhofer la cual representa prácticamente al patrón secundario.

La expresión correspondiente a la región de Fresnel y haciendo las siguientes consideraciones:

1.- El valor de R es grande comparado con las distancias x', y' por lo tanto la expresión de r se reduce, despreciando los términos de orden superior al primero:

$$\begin{aligned} r &\cong R - (\alpha x' + \beta y') = R + r_b \\ r_b &= -(\alpha x' + \beta y') \end{aligned}$$

sustituyendo los valores de α y β :

$$r_0 \cong x' \cos \varphi \sin \theta + y' \sin \varphi \sin \theta = \sin \theta (x' \cos \varphi + y' \sin \varphi)$$

con lo cual se obtiene:

$$E_d = \frac{j}{2\lambda R} e^{-jkR} \iint F(x, y) e^{jk \sin \theta (x' \cos \varphi + y' \sin \varphi)} (\cos \theta + \hat{i}_z \cdot \hat{s}) dx dy$$

2.- Considerando que el vector \hat{s} tiene la misma dirección y sentido que el vector unitario

\hat{i}_z en el eje z , el producto escalar $\hat{i}_z \cdot \hat{s}$, será igual a la unidad. Esto es válido si la fase de dicho campo es constante en el plano de abertura, en estas condiciones:

$$E_d \cong \frac{j}{2\lambda R} e^{-jkR} \iint F(x, y) e^{jk \sin \theta (x' \cos \varphi + y' \sin \varphi)} (\cos \theta + 1) dx dy$$

3.- Las expresiones mencionadas en los párrafos anteriores, son correctas siempre que la energía del campo de difracción esté concentrada alrededor del eje Z , en tal caso el ángulo θ tiende a cero y $\cos \theta \cong 1$. Por lo tanto es posible considerar que:

$$E_d \cong \frac{j}{\lambda R} e^{-jkR} \iint F(x, y) e^{jk \sin \theta (x' \cos \varphi + y' \sin \varphi)} dx dy$$

Expresión que determina el patrón de radiación en la región de Fraunhofer, con una distribución de amplitud $F(x, y)$ en el plano de abertura.

2.6 TRAZO DE UN PATRON DE RADIACION SECUNDARIO

Para determinar dicho patrón, se considera que el valor de la integral es igual con $g(\theta, \varphi)$, en esta forma la expresión se convierte en: (3)

$$E_d = \frac{j}{\lambda R} e^{-jkR} g(\theta, \varphi)$$

donde

$$g(\theta, \varphi) = \iint F(x, y) e^{jk \sin \theta (x' \cos \varphi + y' \sin \varphi)} dx dy$$

Considerando las variables x, y en coordenadas polares:

$$\begin{aligned} x &= \rho \cos \varphi' \\ y &= \rho \operatorname{sen} \varphi' \end{aligned}$$

el valor de $F(x, y)$ cambiará a $f(\rho, \varphi')$ y además:

$$dx \, dy = \rho \, dr \, d\varphi' \quad (4)$$

$$x \cos \varphi + y \operatorname{sen} \varphi = \rho (\cos \varphi' \cos \varphi + \operatorname{sen} \varphi' \operatorname{sen} \varphi) = \rho \cos(\varphi - \varphi')$$

por lo tanto:

$$\mathcal{H}(u, \varphi) = \int_0^{2\pi} \int_0^a f(\rho, \varphi') e^{jk\rho \operatorname{sen} \theta \cos(\varphi - \varphi')} r \, dr \, d\varphi'$$

donde los límites de la integral corresponden al caso bajo estudio

Considerando nuevas variables:

$$r = \frac{\rho}{a}; \quad u = ka \operatorname{sen} \theta = \frac{2\pi a}{\lambda} \operatorname{sen} \theta = \frac{\pi D}{\lambda} \operatorname{sen} \theta$$

donde a corresponde al radio del plano de abertura y D al diámetro del mismo.

La función $f(\rho, \varphi')$ cambiará a $f(r, \varphi')$ por ser a constante y $\mathcal{H}(\theta, \varphi)$ se modifica a $\mathcal{H}(u, \varphi)$, con lo cual se obtendrá:

$$\mathcal{H}(u, \varphi) = a^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 f(r, \varphi') e^{j\pi r \cos(\varphi - \varphi')} r \, dr \, d\varphi'$$

expresión del campo de difracción normalizada, la cual permite determinar el patrón relativo de intensidad de campo.

Aplicando la expresión anterior para el caso de un plano de abertura uniformemente iluminado, es decir, considerando el plano de abertura con fase y amplitud uniforme, obtendremos los siguientes valores:

$$\begin{aligned} \mathcal{H}(u, \varphi) &= a^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 e^{j\pi r \cos(\varphi - \varphi')} r \, dr \, d\varphi' \\ &= a^2 \int_0^{2\pi} \int_0^1 \cos[\pi r \cos(\varphi - \varphi')] r \, dr \, d\varphi' \end{aligned}$$

dado que $f(r, \varphi')$ será constante e igual a la unidad para la expresión normalizada.

Recordando que (5)

$$2\pi J_0(x) = \int_0^{2\pi} \cos(x \cos \varphi) \, d\varphi$$

y haciendo $x = ur$

$$2\pi J_0(ur) = \int_0^{2\pi} \cos[ur \cos(\varphi - \varphi')] d\varphi$$

sustituyendo e integrando con respecto a φ

$$g(u) = 2\pi a^2 \int_0^1 r J_0(ur) dr$$

además (6)

$$\int_0^1 r J_0(ur) dr = \frac{J_1(u)}{u}$$

por lo tanto

$$g(u) = 2\pi a^2 \frac{J_1(u)}{u}$$

considerando que:

$$J_p(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(\frac{j}{2}x\right)^{p+2k}}{K!(p+K)!}$$

y (7)

$$\Lambda_p(x) = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{1}{K!(p+K)!} \left(\frac{j}{2}x\right)^{2k}$$

sustituyendo:

$$J_p(x) = \frac{\left(\frac{1}{2}x\right)^p}{p!} \Lambda_p(x)$$

y para $p = 1$

$$J_1(u) = \frac{u}{2} \Lambda_1(u)$$

$$\Lambda_1(u) = \frac{2 J_1(u)}{u}$$

en donde

$$g(u) = \pi a^2 \Lambda_1(u)$$

Siendo el valor de πa^2 constante, basta con tabular el valor de $\Lambda_1(u)$ para determinar el patrón relativo de potencia, ya que:

$$P(u) = \frac{|E_d|^2}{2\sqrt{\epsilon/\mu}}$$

de donde $|E_d|^2$ variará según el valor de $|\Delta_1(u)|^2$

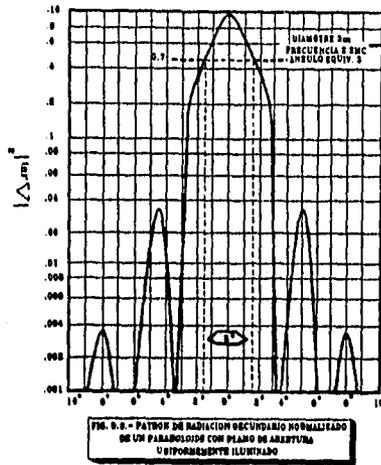
Se considerará a continuación el caso de un reflector parabólico con dimensiones y frecuencia de operación mencionados y con su plano de abertura uniformemente iluminado.

Diámetro del reflector $D = 3 \text{ m}$
 Frecuencia de operación $f = 2000 \text{ Mhz}$
 Longitud de onda $\lambda = 0.15 \text{ m}$

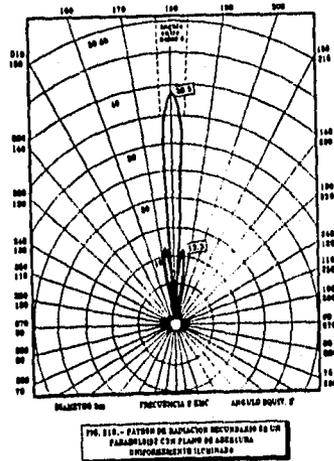
Aplicando estos datos a la expresión de $|\Delta_1(u)|^2$ se puede obtener el patrón relativo de potencia en la siguiente forma, tomando los valores de $\Delta_1(u)$ en las tablas de funciones de Eugene Jahnke and Fritz Emde. Tabla I

TABLA I					
CARACTERISTICAS DEL PATRON DE RADIACION SECUNDARIO PARA UN PLANO DE ABERTURA UNIFORMEMENTE ILUMINADO					
ϕ°	$\text{SEN } \phi^\circ$	$u = \frac{\pi D}{\lambda} \text{SEN } \phi^\circ$	$\Delta_1(u)$	$ \Delta_1(u) ^2$	RELACION ENTRE LOS VALORES DE $\Delta_1(u)$
0	0.000	0.0	1.00	1.00	0.00
1	0.017	1.1	0.85	0.720	-1.45
2	0.034	2.1	0.64	0.290	-5.30
3	0.052	3.2	0.16	0.020	-17.00
4	0.069	4.3	-0.08	0.006	-22.20
5	0.087	5.4	-0.12	0.014	-19.00
6	0.104	6.5	-0.04	0.001	-30.00
7	0.121	7.5	0.03	0.000	∞
8	0.139	8.7	0.06	0.003	-25.20
9	0.156	9.8	0.01	0.000	∞
10	0.173	10.1	0.00	0.000	∞

El patrón relativo de potencia normalizado, obtenido para una distribución uniforme del campo en el plano de abertura, se muestra en la figura 2.9



El patrón de potencia relativo en decibeles se representa en la figura 2.10



La relación que existe entre el valor máximo del lóbulo principal y el correspondiente al primer lóbulo secundario, se determina en db y para este caso especial:

$$db = 10 \log \frac{w_1}{w_2} = 10 \log \left| \frac{\Lambda_1(u_1)}{\Lambda_1(u_2)} \right|$$

$$db = 10 \log \frac{1}{0.017} = 10 \log 58.8 = 17.7 \text{ db}$$

2.7 ANGULO EQUIVALENTE DEL HAZ

El ángulo equivalente del haz, se determinará considerando la abertura entre los puntos del patrón relativo de potencia correspondientes a la mitad del valor máximo y representará el ángulo en el cual se considera concentrada la energía del haz.

Cuando se haya obtenido el patrón relativo de potencia, bastará con determinar el ángulo comprendido entre puntos de media potencia.

Para el presente caso se tiene un ángulo de abertura de 3° según se indica en la figura 2.9

Cuando no se ha determinado el patrón de radiación, es posible obtener el ángulo equivalente del haz considerando que:

$$|\Lambda'_1(u)|^2 = \frac{|\Lambda_1(u)|^2}{2}$$

donde $\Lambda'_1(u)$ corresponde al valor de $g(u)$ para la mitad de la máxima potencia.

$$\begin{aligned} \text{Si } \Lambda_1(u) &= 1 \\ \Lambda'_1(u) &= 0.7 \end{aligned}$$

correspondiendo a (u) de acuerdo con la tabla de funciones, un valor de 1.6, por lo tanto, sustituyendo en la expresión correspondiente se obtiene:

$$u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta = 1.6$$

$$\sin \theta = \frac{1.6}{\pi} \frac{\lambda}{D} = 0.51 \frac{\lambda}{D}$$

donde

$$\theta = \text{arc sen } 0.51 \frac{\lambda}{D} \cong 0.51 \frac{\lambda}{D}$$

por ser $D \gg \lambda$. El valor total del ángulo equivalente será:

$$2\theta = 1.02 \frac{\lambda}{D}$$

para el caso bajo estudio

$$2\theta = 0.05 \text{ radianes} = 3^\circ$$

El ángulo correspondiente al primer nulo se obtendrá de la misma expresión cuando:

$$A_1(u) = 0$$

ó

$$J_1(u) = 0$$

en donde

$$u = \frac{\pi D}{\lambda} \sin \theta = 3.83$$

por lo tanto

$$\theta = \arcsin 1.22 \frac{\lambda}{D} \cong 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

El ángulo total entre los dos primeros nulos será:

$$2\theta = 2.24 \frac{\lambda}{D}$$

y para el ejemplo

$$2\theta = 0.12 \text{ radianes} = 6.8^\circ$$

2.8 GANANCIA

Otra característica de importancia es la ganancia del sistema radiador, la cual se determina considerando el valor máximo de la función de ganancia:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{\text{Potencia radiada por unidad de ángulo sólido en la dirección } (\theta, \varphi)}{\text{Potencia media por unidad de ángulo sólido}}$$

De acuerdo con la figura 2.8 y recordando que la intensidad de radiación en dirección (θ, φ) es E_d , la potencia por unidad de superficie en dicha dirección será:

$$P_{(\theta, \varphi)} = \frac{|E_d|^2}{2\sqrt{\mu/\epsilon}} = \frac{1}{2} \left| \frac{\epsilon}{\mu} \right|^{1/2} |E_d|^2$$

Para determinar la potencia por unidad de ángulo sólido se multiplica el valor anterior por el cuadrado de la distancia R .

$$P_{(\theta,\varphi)} = \frac{1}{2} \left| \frac{\epsilon}{\mu} \right|^{1/2} |E_d|^2 R^2$$

El valor de la función de ganancia será máximo en dirección del eje Z , es decir cuando el ángulo θ sea 0° , obteniéndose para este caso que:

$$|E_d|^2 = \frac{1}{\lambda^2 R^2} \left| j e^{-jkR} \iint F(x,y) dx dy \right|^2$$

Por otra parte en un punto (x,y) del plano de abertura, la potencia radiada por unidad de superficie se representa por la componente normal del vector de POYNTING en dicho punto:

$$P = \frac{1}{2} \left| \frac{\epsilon}{\mu} \right|^{1/2} |F(x,y)|^2 \vec{i}_z \cdot \vec{s}$$

La potencia total radiada a través del plano de abertura será igual a la integral del vector de Poynting sobre la superficie de abertura.

$$P_T = \frac{1}{2} \left| \frac{\epsilon}{\mu} \right|^{1/2} \iint |F(x,y)|^2 \vec{i}_z \cdot \vec{s} dx dy$$

Para el presente caso y de acuerdo con las consideraciones anteriores; el valor de la función de ganancia será máximo cuando $\theta = 0$

$$\vec{i}_z \cdot \vec{s} = \cos \theta \cong 1$$

por lo tanto

$$P_T = \frac{1}{2} \left| \frac{\epsilon}{\mu} \right|^{1/2} \iint |F(x,y)|^2 dx dy$$

La potencia media por unidad de ángulo sólido será:

$$P_T = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{2} \left| \frac{\epsilon}{\mu} \right|^{1/2} \iint |F(x,y)|^2 dx dy$$

La ganancia será por lo tanto:

$$G_{\theta=0} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\left| \iint F(x,y) dx dy \right|^2}{\iint |F(x,y)|^2 dx dy}$$

Considerando que $F(x, y)$ es constante en la superficie del plano de abertura

$$G_{0-0} = \frac{4\pi}{\lambda^2} \iint dx dy = \frac{4\pi}{\lambda^2} A$$

El valor de la ganancia del sistema radiador en el presente ejemplo será:

$$G = \frac{4\pi}{\lambda^2} A = \frac{4\pi}{\lambda^2} \frac{\pi D^2}{4} = 6900$$

en db

$$G_{db} = 10 \log 6900 = 38.4 \text{ db}$$

Cuando se desee disminuir el valor máximo de los lóbulos secundarios, será necesario modificar la configuración del campo en el plano de abertura, haciendo que su distribución de amplitud no sea uniforme. Esto también producirá una disminución en la ganancia del sistema radiador y un aumento en el valor del ángulo equivalente del haz.

2.9 EFICIENCIA

La eficiencia de un reflector parabólico, se determina relacionando el valor de su ganancia real al valor de la ganancia de un reflector parabólico, de iguales dimensiones, pero con su plano de abertura uniformemente iluminado. El valor de dicha eficiencia podrá ser determinado haciendo las siguientes consideraciones:

- 1.- La amplitud del campo eléctrico en un punto distante, sobre el eje del haz, se deberá a la contribución de todas las áreas elementales del plano de abertura.

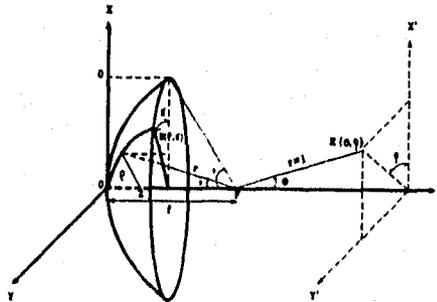


FIG. 2.11.- ESQUEMA PARA DETERMINAR LA DISTRIBUCION DEL CAMPO ELECTRICO EN EL PLANO DE ABERTURA

De acuerdo con la figura 2.11

$$E_d \cong \int_0^a \rho |E(\rho)| d\rho \int_0^{2\pi} d\phi$$

Considerando una área circular correspondiente al plano de abertura del reflector, se tendrá:

$$E_d \cong 2\pi \int_0^a |E(\rho)| \rho d\rho$$

donde a es el radio de la abertura.

Según se verá en el párrafo 2.10 el campo $E(\rho)$ tiene por expresión:

$$E(\rho) = \left[2 \sqrt{\frac{\mu \epsilon}{4\pi}} \frac{P_T}{f} \right]^{1/2} \frac{e^{-jk\rho}}{f} \cos^2 \frac{\psi}{2} G(\psi)^{1/2}$$

2.- El valor de la ganancia del sistema radiador es proporcional a $E^2(\psi)$ según la expresión:

$$G = \frac{P(\psi)}{P_T / 4\pi} = \frac{4\pi}{P_T} \frac{E^2(\psi)}{2 \sqrt{\epsilon/\mu}}$$

resultando

$$G = K_1 \left[\int_0^a |G(\psi)|^{1/2} \cos^2 \frac{\psi}{2} \rho d\rho \right]^2$$

para $\psi = 0$ $G(\psi) = 1$

$$G = K_1 \left[\int_0^a \rho d\rho \right]^2 = K_1 \frac{a^4}{4}$$

3.- La ganancia de una antena formada por un elemento radiador iluminando una área circular πa^2 , separada una distancia f , se determina tomando en cuenta que:

a.- La densidad de potencia que el elemento radiador permite obtener, a una distancia f será:

$$G_r \left(\frac{P_{10}}{4\pi f^2} \right)$$

en donde G_r corresponde a la ganancia de dicho elemento radiador.

b.- La potencia interceptada por el área circular

$$G_r \frac{P_{10}}{4\pi f^2} \pi a^2$$

c.- La ganancia de este sistema de referencia será:

$$G' = G_r G_t \frac{\pi a^2}{4\pi f^2}$$

en donde G_r , ganancia elemento radiador

G_t , ganancia teórica de una área iluminada uniformemente.

por lo tanto:

$$G' = G_r \frac{\pi a^2}{4\pi f^2} \frac{4\pi A}{\lambda} = G_r \left(\frac{\pi a^2}{\lambda f} \right)^2$$

4.- La constante de proporcionalidad K_t , se obtendrá igualando el valor de ganancia G dado en el párrafo 2, con la correspondiente G' al sistema radiador del párrafo 3.

$$K_t = 4G_r \left(\frac{\pi}{\lambda f} \right)^2$$

sustituyendo en la expresión de G

$$G = 4G_r \left(\frac{\pi}{\lambda f} \right)^2 \left[\int_0^{\psi} \rho G(\psi)^{1/2} \cos^2 \frac{\psi}{2} d\psi \right]^2$$

5.- Considerando la ecuación que describe una curva parabólica en coordenadas polares

$$\rho = 2F \operatorname{tg} \frac{\psi}{2}$$

se obtendrá el valor correspondiente a $d\psi$

$$d\rho = \frac{F}{\cos^2 \psi/2} d\psi$$

La longitud focal del reflector se relaciona con el diámetro D y su apertura angular, por la expresión

$$f = \frac{D}{4} \cot \frac{\psi}{2}$$

sustituyendo (9)

$$G = \left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2 \cot^2 \frac{\psi}{2} \left[\int_0^{\psi} |G(\psi)|^{1/2} \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} d\psi \right]^2$$

El factor $\left(\frac{\pi D}{\lambda}\right)^2$ corresponde al valor de la ganancia de un reflector parabólico con su

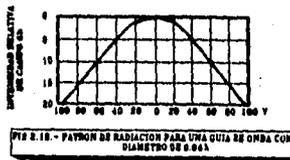
plano de abertura uniformemente iluminado. Por lo tanto si se representa por η a la eficiencia se tendrá:

$$\eta = \cot^2 \frac{\psi}{2} \left[\int_0^{\psi/2} |G(\psi)|^{1/2} \operatorname{tg} \frac{\psi}{2} d\psi \right]^2$$

De esta expresión se determina que la eficiencia depende de la distribución del patrón primario, ya que éste determina el grado de iluminación en el plano de abertura. También depende del valor del ángulo subtendido, ya que cuando dicho ángulo aumenta se intercepta mayor energía pero la iluminación es menos uniforme.

Cuando se conoce el valor del patrón de radiación primario, el valor de la integral puede ser obtenido por métodos gráficos determinándose así, la relación que existe entre el ángulo ψ y la eficiencia del reflector.

La figura 2.12 representa el patrón de radiación correspondiente a una guía de onda circular cuyo diámetro interior es de 0.84λ (10)



La figura 2.13 representa la eficiencia de un reflector parabólico, en función del ángulo subtendido, iluminado según el patrón representado en la figura anterior. (11)

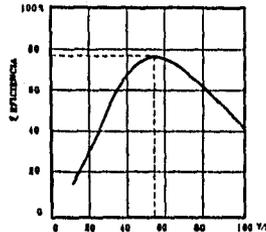


FIG. 2.13.- EFICIENCIA DE UN REFLECTOR PARABOLICO EN FUNCION DEL ANGULO SUBTENDIDO ψ

Es posible observar en las figuras mencionadas que la máxima eficiencia se obtiene cuando el ángulo ψ es de 125° ó sea que cuando en la periferia del plano de abertura el valor de intensidad de campo se encuentra 8 a 12 db abajo del valor máximo en el centro. Esta relación en db se emplea normalmente en el diseño de reflectores parabólicos.

Para el caso mencionado el sistema radiador dará teóricamente una eficiencia de 80% , pero debido a defectos en la fase y polarización del campo, así como en el aplanado de la superficie del reflector, la eficiencia se reduce a aproximadamente 65%

2.10 ELEMENTO RADIADOR

Entre los diferentes tipos de radiadores comunmente utilizados para iluminar un reflector parabólico, se encuentra el dipolo con reflector y la guía de onda con sección rectangular, según se ilustra en las figuras 2.14 y 2.15

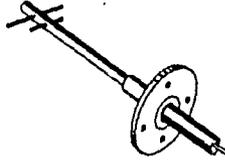


FIG. 2.14.- DIPOLO CON REFLECTOR

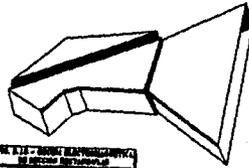


FIG. 2.15.- GUÍA DE ONDA CON SECCIÓN RECTANGULAR

RADIADORES TÍPICOS UTILIZADOS PARA ILUMINAR PARABOLOIDES

Los patrones de radiación correspondientes, a estos radiadores se muestran en las figuras 2.16 y 2.17 (12)

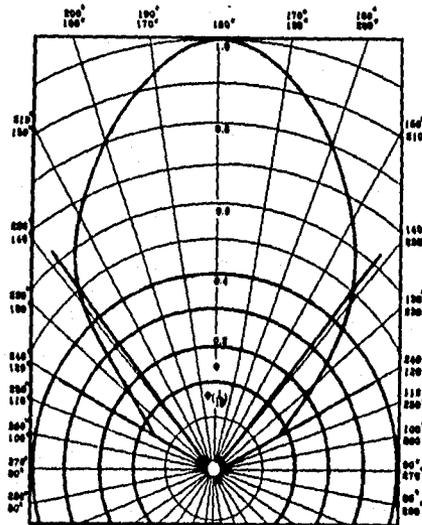
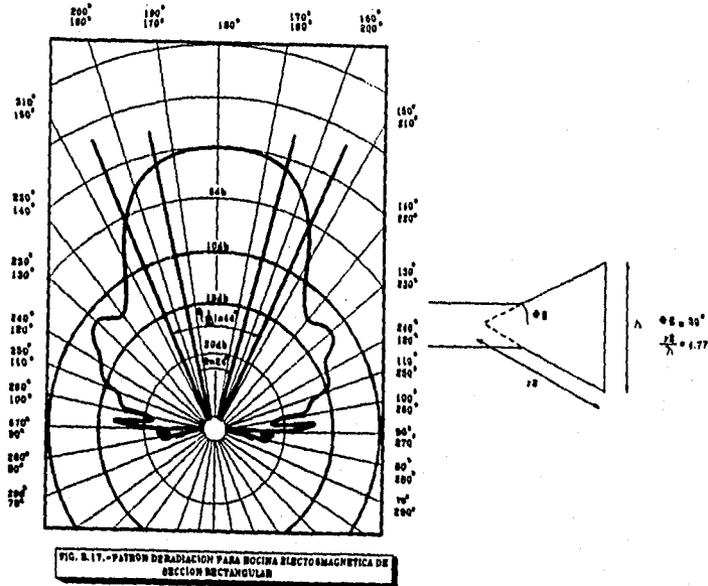


FIG. 2.16.- PATRON PRIMARIO DE POTENCIA PARA UN DIPOLO COLOCADO A UNA DISTANCIA $\lambda/4$ DE UN PLANO IMPEDIDO EMPLEADO COMO REFLECTOR



El campo eléctrico en el plano de abertura, depende del patrón de radiación del elemento que ilumina al reflector. La distribución de amplitud, fase y polarización de dicho campo, representan los principales factores que determinan la configuración del patrón de radiación secundario.

Haciendo referencia a la figura 2.11, la potencia que en dirección θ, φ produce el elemento radiador a una distancia $r = l$, se expresa en función de la intensidad de campo por:

$$P(\theta, \varphi) = \frac{E^2(\theta, \varphi)_{r=l}}{2\sqrt{\mu/\epsilon}}$$

en donde

$$E(\theta, \varphi)_{r=l} = \left[2\sqrt{\mu/\epsilon} P(\theta, \varphi) \right]^{1/2}$$

Recordando que la función de ganancia es, por definición:

$$G(\theta, \varphi) = \frac{P(\theta, \varphi)}{\frac{P_T}{4\pi}}$$

se tendrá:

$$P(\theta, \varphi) = \frac{P_T}{4\pi} G(\theta, \varphi)$$

y la expresión del campo primario, será:

$$E(\theta, \varphi)_{r=1} = \left| 2\sqrt{\mu/\epsilon} \frac{P_T}{4\pi} G(\theta, \varphi) \right|^{1/2}$$

El vector intensidad de campo sobre la superficie del reflector situado a una distancia r del radiador, es: (13)

$$\bar{E}_0 = \left| 2\sqrt{\mu/\epsilon} \frac{P_T}{4\pi} G(\xi, \psi) \right|^{1/2} \frac{e^{-jkr}}{r} \bar{e}_0$$

donde \bar{e}_0 es el vector unitario que define la dirección y sentido

El campo reflejado en ese mismo punto será representado por el vector: (14)

$$\bar{E}_r = \left| 2\sqrt{\mu/\epsilon} \frac{P_T}{4\pi} G(\xi, \psi) \right|^{1/2} \frac{e^{-jkr}}{r} \bar{e}_r$$

donde el vector unitario \bar{e}_r define la polarización de la onda reflejada. De acuerdo con las condiciones de frontera para una onda plana cuyo vector eléctrico es paralelo a la superficie de reflexión los vectores \bar{e}_0 y \bar{e}_r se relacionan entre sí por la siguiente expresión:

$$\bar{n} \times (\bar{e}_0 + \bar{e}_r) = 0$$

donde \bar{n} es un vector unitario normal a la superficie del reflector, por lo tanto el campo incidente y el reflejado son de igual amplitud pero están 180° fuera de fase.

La intensidad de campo en el punto (ρ, ξ) del plano de abertura quedará determinada por la onda reflejada con el correspondiente retraso de fase, al recorrer la distancia $f-z$ entre el reflector y el plano de abertura:

$$E(\rho, \xi) = E_r e^{-jk(f-z)} = \left| 2\sqrt{\mu/\epsilon} \frac{P_T}{4\pi} \right|^{1/2} \frac{G(\xi, \psi)^{1/2}}{r} e^{-jk(f-z+r)} \bar{e}_r$$

donde $f-z+r$ es la trayectoria óptica entre el foco de la parábola y el plano de abertura y será también igual a:

$$f-z+r = 2f$$

Considerando el caso especial de un elemento radiador isotrópico, $G(\xi, \psi)$ será igual a la unidad y la fase del campo en el plano de abertura será constante:

$$|E| = \left| 2\sqrt{\mu/\epsilon} \frac{P_T}{4\pi} \right|^{1/2} \frac{e^{-j2kf}}{r}$$

De acuerdo con la expresión de una parábola en coordenadas polares:

$$r = \frac{f}{\cos^2 \psi/2}$$

y en este caso la expresión del campo eléctrico toma la forma:

$$|E| = \left| 2\sqrt{\mu/\epsilon} \frac{P_T}{4\pi} \right|^{1/2} \frac{e^{-j2kf}}{f} \cos^2 \frac{\psi}{2}$$

de la cual puede deducirse que el campo en el plano de abertura tendrá una fase constante, pero su amplitud variará de acuerdo con el valor de $\cos^2 \frac{\psi}{2}$, según se muestra en la figura 2.18

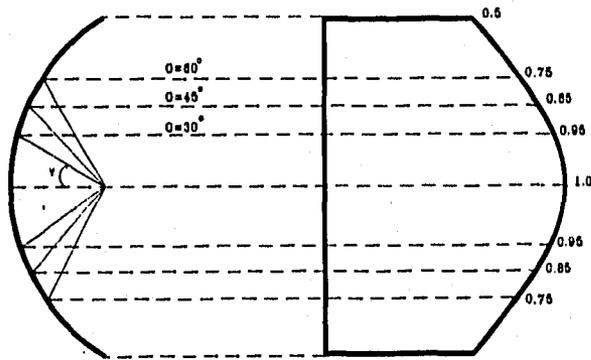


FIG. 2.18.- VARIACION DE LA AMPLITUD DEL CAMPO ELECTRICO EN EL PLANO DE ABERTURA DE UN PARABOLOIDE ILUMINADO POR UN RADIADOR ISOTROPICO SITUADO EN EL PUNTO FOCAL

Requisitos que debe satisfacer el elemento radiador:

- 1.- Deberá ser pequeño y con una configuración de campo de radiación tal, que su frente de onda sea similar al de una antena isotrópica, con objeto de obtener máxima ganancia y lóbulos secundarios pequeños.
- 2.- El ángulo equivalente de su patrón de radiación, deberá ser igual al ángulo subtendido por el reflector, desde su punto focal, con objeto de aumentar su eficiencia.

Cuando el elemento radiador se coloca en el centro del haz, intercepta una pequeña porción del campo reflejado, modificando la distribución de fase en el campo de abertura y por consiguiente el patrón de radiación secundario, aumentando los lóbulos secundarios y disminuyendo la amplitud del lóbulo principal, según se muestra en la figura 2.19. Además, la energía interceptada, modifica el valor de la impedancia del elemento radiador, produciendo un desacoplamiento entre éste y el medio de propagación. (15)

Considerando que la distancia entre el radiador y el reflector es mucho mayor que λ , el valor absoluto de la impedancia del elemento radiador resulta casi constante para diferentes frecuencias; pero el valor correspondiente a su fase varía rápidamente, ya que la distancia recorrida expresada en longitudes de onda es proporcional a la frecuencia.

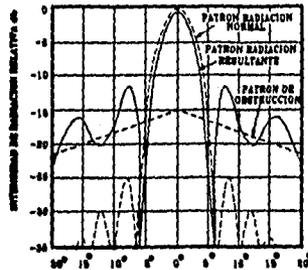


FIG. 2.19.- EFECTO QUE SOBRE EL PATRON DE RADIACION PRODUCE EL ELEMENTO RADIADOR CUANDO SE COLOCA EN EL EJE DEL HAZ

Manteniendo constante la frecuencia de operación y modificando la posición que guarda el elemento radiador, con respecto al reflector, se producirá el mismo efecto que se menciona en el párrafo anterior. En la figura 2.20 se representan las variaciones producidas en el valor de la ganancia de un paraboloide, cuando la posición del elemento radiador se modifica con respecto al punto focal. El valor máximo de ganancia se obtiene cuando la posición del elemento radiador coincide con el punto focal. (16)

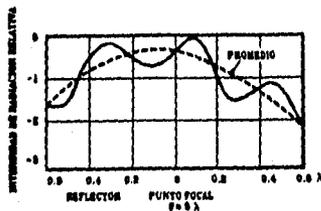


FIG. 2.20.- GANANCIA DE UN REFLECTOR PARABOLICO EN FUNCION DE LA DISTANCIA AXIAL DEL ELEMENTO RADIADOR CON RESPECTO AL FOCO

Con objeto de eliminar el efecto mencionado anteriormente, se han desarrollado varias técnicas para diseñar sistemas radiadores, capaces de operar dentro de una banda amplia de frecuencias. Las técnicas más comunes son:

- 1.- Instalar una placa circular en el vértice del reflector parabólico. (17)
- 2.- Giro de la polarización. (18)
- 3.- Modificar la posición del elemento radiador.

En las tablas 2 y 3 se muestra un resumen de las principales características para diferentes tipos de antenas parabólicas, en un rango de frecuencia de operación comprendido entre los 450 y 2000 Mhertz.

Las figuras 2.24, 2.25 y 2.26 muestran gráficamente la relación de ondas estacionarias en un ancho de banda determinado y para diferentes tipos de antenas parabólicas.

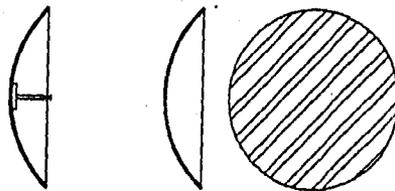


FIG. 2.24.- PLACA CIRCULAR EN EL VÉRTICE

FIG. 2.25.- GIRO DE POLARIZACIÓN

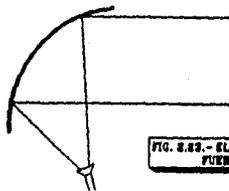


FIG. 2.26.- ELEMENTO RADIADOR COLOCADO FUERA DEL HAZ REFLEJADO

DIFERENTES TÉCNICAS PARA ANULAR EL EFECTO QUE SOBRE EL ELEMENTO RADIADOR PRODUCE EL HAZ REFLEJADO

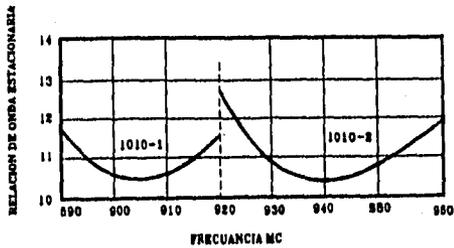


FIG. 2.24.- RELACION DE ONDAS ESTACIONARIAS PARA ANTENAS PARABOLICAS ANDREW TIPO 1010-1 Y 1010-2

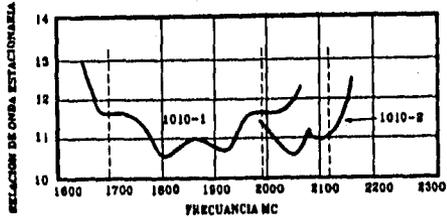


FIG. 2.25.- RELACION DE ONDAS ESTACIONARIAS PARA ANTENAS PARABOLICAS ANDREW TIPO 2210-1 Y 2210-3

TABLA II							
ESPECIFICACIONES PARA ANTENAS PARABOLICAS "MARK"							
TIPO	DIAMETRO EN METROS	RANGO DE FRECUENCIA DE OPERACION EN MC	GANANCIA RESPECTO ANT. 1507. 4b	ANGULO EQUIV. DEL HAZ	RELACION FRENTE A ESPALDA 4b	RELACION ENTRE LOBULOS PRINC. Y SEC. 4b.	MAX. RELACION DE ONDA ESTACIONARIA
P-942	1.6	890 - 960	17	22.0	- 28	- 21	1.25
P-972	1.6	890 - 960	22	11.0	- 28	- 22	1.25
P-9120	3.0	890 - 960	27	6.0	- 30	- 22	1.25
P-9160	4.6	890 - 960	30	6.2	- 30	- 22	1.25
P-472	1.6	450 - 470	17	26.0	- 25	- 20	1.30
P-4120	3.0	450 - 470	22	16.0	- 28	- 22	1.25
P-4180	4.6	450 - 470	26	10.0	- 28	- 22	1.25

TABLA III							
ESPECIFICACIONES PARA ANTENAS PARABOLICAS "ANDREW"							
TIPO	DIAMETRO EN METROS	RANGO DE FRECUENCIA DE OPERACION EN MC	GANANCIA RESPECTO ANT. 1507. 4b	ANGULO EQUIV. DEL HAZ	RELACION FRENTE A ESPALDA 4b	RELACION ENTRE LOBULOS PRINC. Y SEC. 4b.	MAX. RELACION DE ONDA ESTACIONARIA
1010-1	3.0	890 - 960	26.1	6.6	- 24	- 17	1.35
1010-2	3.0	920 - 960	27.9	7.0	- 24	- 14	1.36
2010-1	3.0	1700 - 1990	32.4	3.7	- 34	- 17	1.30
2010-3	3.0	1990 - 2110	33.6	3.3	- 34	- 20	1.30
2008-1	2.4	1700 - 1990	30.6	4.7	- 30	- 20	1.30
2008-3	2.4	1990 - 2110	30.7	4.3	- 30	- 18	1.30
1006-1	1.6	890 - 920	21.2	15.0	- 22	- 21	1.35
1006-2	1.6	920 - 960	21.9	15.0	- 25	- 21	1.35
2006-1	1.6	1700 - 1850	26.6	7.0	- 27	- 19	1.35
2006-2	1.6	1850 - 1990	26.4	7.0	- 27	- 20	1.35
2006-3	1.6	1990 - 2110	26.6	6.0	- 26	- 22	1.35
1004-1	1.2	890 - 920	19.1	23.0	- 16	- 18	1.35
1004-2	1.2	920 - 960	18.3	23.0	- 21	- 20	1.35
2004-1	1.2	1700 - 1850	24.6	9.6	- 22	- 19	1.35
2004-2	1.2	1850 - 1990	25.0	9.2	- 24	- 19	1.35
2004-3	1.2	1990 - 2110	26.4	8.1	- 27	- 19	1.35

GLOSARIO

- ANTENA.-** Dispositivo y conductor metálico que permite recibir y emitir las ondas electromagnéticas. Existen antenas transmisoras y receptoras.
- ANTENA PARABOLICA.-** Las antenas parabólicas de que se dispone comercialmente se alimentan de manera convencional, por medio de una antena de cono en su foco y generalmente tienen una eficiencia del 55% ó más.
- DISPERSION DE RAYO.-** Divergencia angular del rayo de luz, medida en grados.
- DESVANECIMIENTO.-** La causa principal del desvanecimiento en una señal proviene de los estratos de la atmósfera o de la superficie y condición de la tierra por donde pasa la trayectoria y esto ocasiona interferencia tanto destructiva como constructiva en el nivel de la señal de entrada.
- DIVERSIDAD.-** Diversidad se refiere a la recepción simultánea de una señal de radio sobre varias trayectorias. Las trayectorias de la señal se combinan de tal manera en el equipo de radio que la señal compuesta se afecta menos por los desvanecimientos.
- EFICIENCIA.-** Total de flujo de microondas recibido por un receptor en relación con la cantidad total de microondas emitidas por el transmisor.
- ENLACE.-** El enlace se define como la vía principal de transmisión que contiene a la información transmitida.
- FRECUENCIA.-** Al número de ciclos por segundo se le denomina "frecuencia" f la unidad de la frecuencia es el Hertzio (Hz). 1 Hz = 1 ciclo por segundo. Al tiempo necesario para que se repita una oscilación se le conoce como periodo T .
La relación entre frecuencia y periodo es: $f = 1/T$
- GANANCIA.-** A una frecuencia dada, la ganancia de una antena parabólica es función de su área efectiva.

HAZ.- El haz de rayos tiene propiedades de expansión conforme se propaga en el espacio. Estas propiedades de expansión dan como resultado reflexiones y transiciones de fases cuando la onda pasa sobre un obstáculo; el efecto es el incremento o decremento de la señal que se recibe.

LONGITUD DE ONDA.- La longitud de onda λ , es la distancia entre dos máximos de presión sucesivos ó entre dos mínimos de presión sucesivos de una onda plana.

La relación entre λ , c , T y f es: $\lambda = cT = c/f$

La longitud de onda se mide en metros.

LINEA DE VISTA.- En los sistemas de línea de vista las ondas de radio viajan en línea recta y se limitan en el horizonte a causa de la curvatura de la tierra. Generalmente, las ondas de radio que se propagan en línea recta se curvan o difractan más allá del horizonte óptico, el cual limita la visión más allá de un cierto punto.

MODULACION EN FRECUENCIA.- La modulación en frecuencia se usa ampliamente, ya que presenta mejoría en los factores de ruido, principalmente en el compromiso del ancho de banda para mejorar la relación señal a ruido arriba de cierto umbral de ruido.

POTENCIA.- La potencia es la suma algebraica de la salida del transmisor (en dBm ó dBW) y de las ganancias y pérdidas del sistema de antena de transmisión; el sistema incluye toda la antena y los elementos de la línea de transmisión, desde el transmisor hasta la alimentación de la antena.

RUIDO.- La cantidad de ruido es la medida del ruido que produce una red real en comparación con el de una red ideal.

PERDIDA DE LA TRAYECTORIA.- Para todos los onjetivos y fines, la pérdida de la trayectoria arriba de 10 Ghz se puede considerar como pérdida en el espacio libre.

BIBLIOGRAFIA

Ingeniería de Sistemas de Telecomunicaciones
Roger L. Freeman
Edit. Limusa

Introducción a los Sistemas de Comunicación
Ferrel G. Siremler
Edit. Addison-Wesley Iberoamericana, S.A.

The Ku-Band Satellite Handbook
Mark Long
Edit. Howard W. Sams & Co.

Microwave System Parameters for Reliable Communications
A. Alvira - I.T. Corbell
Transactions Paper - AIEE

Microwave Antenna Theory and Design
Samuel Silver
Mac Graw Hill

Antennas
John D. Kraus
Mac Graw Hill

Parabolic Antennas Design for Microwaves
C. C. Cutler
Bell Telephone System Technical Publications

Microwave Propagation and Site Planning
J. Rechas
Federal Telecommunications Laboratories