

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



MODELADO Y SIMULACION DE TECNICAS DE
CONFORMACION DE HAZ PARA
ANTENAS INTELIGENTES

POR

ING. CESAR GONZALEZ CERVANTES

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA,

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.
DICIEMBRE DE 2004

TM

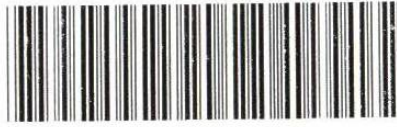
Z5853

.M2

FIME

2004

.G62

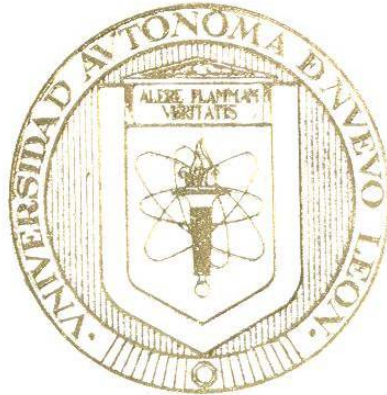


1020150361

UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON

FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA

DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



MODELADO Y SIMULACION DE TECNICAS DE
CONFORMACION DE HAZ PARA
ANTENAS INTELIGENTES

POR

ING. CESAR GONZALEZ CERVANTES

TESIS

EN OPCION AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERIA ELECTRICA
CON ESPECIALIDAD EN ELECTRONICA,

SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N. L.

DICIEMBRE DE 2004

996426

TN

Z5853

.M2

FIME

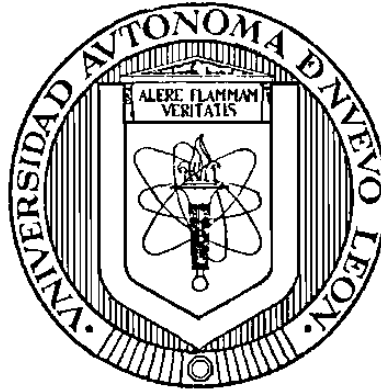
2004

.G62



FONDO
TESIS

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**MODELADO Y SIMULACIÓN DE TÉCNICAS DE
CONFORMACIÓN DE HAZ PARA ANTENAS INTELIGENTES**

POR

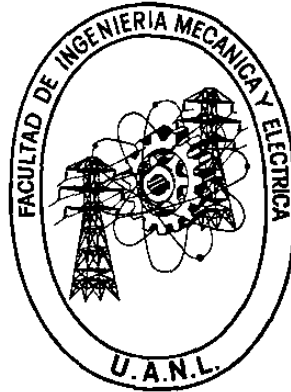
ING. CÉSAR GONZÁLEZ CERVANTES

TESIS

**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN
ELECTRÓNICA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.
DICIEMBRE DE 2004**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POST-GRADO



**MODELADO Y SIMULACIÓN DE TÉCNICAS DE
CONFORMACIÓN DE HAZ PARA ANTENAS INTELIGENTES**

POR

ING. CÉSAR GONZÁLEZ CERVANTES

TESIS

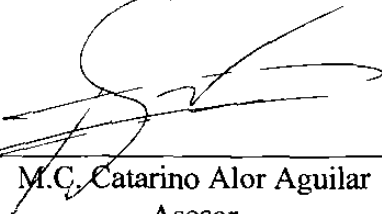
**EN OPCIÓN AL GRADO DE MAESTRO EN CIENCIAS DE LA
INGENIERÍA ELÉCTRICA CON ESPECIALIDAD EN
ELECTRÓNICA**

**SAN NICOLAS DE LOS GARZA, N.L.
DICIEMBRE DE 2004**


**UNIVERSIDAD AUTONOMA DE NUEVO LEON
FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA
DIVISION DE ESTUDIOS DE POST-GRADO**

Los miembros del comité de tesis recomendamos que la tesis "Modelado y Simulación de Técnicas de Conformación de Haz Para Antenas Inteligentes" por el Ing. César González Cervantes con número de matricula: 165103 sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica con la especialidad en Electrónica.

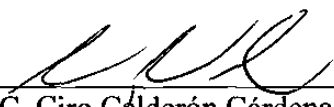
El Comité de Tesis




M.C. Catarino Alor Aguilar
Asesor



M.C. Fernando Estrada Salazar
Coasesor



M.C. Ciro Calderón Cárdenas
Coasesor



Dr. Guadalupe Alan Castillo Rodríguez
Vo.Bo.

Subdirector de la División de Estudios de Post-grado
San Nicolás de los Garza, N.L., Diciembre de 2004.

DEDICATORIAS

A MI ESPOSA:

JUDITH:

Por siempre brindarme incondicionalmente su amor, su ternura y su apoyo.

A MI HIJO:

CESAR OCTAVIO

Quien con su sonrisa y amor es la luz que ilumina mi camino.

A MIS PADRES:

CESAR FRANCISCO (*†*), ALICIA MARGARITA (*†*)

Por darme siempre lo mejor de ellos y ser un ejemplo de perseverancia y lucha por salir adelante.

PROLOGO

El fundamento de esta tesis es abordar el tema de la utilización de un tipo especial de antenas conocidas como antenas inteligentes.

Reciben este particular nombre debido a su característica física de poder adaptar la forma de su patrón de radiación del espectro radioeléctrico. Se pueden clasificar estas antenas en dos tipos: antenas de tipo adaptativo la cual consiste en un arreglo de antenas, que adaptan como su nombre lo indica, el patrón de radiación mismo de acuerdo al ruido, interferencia y trayectorias de diferentes señales para ser ajustadas a diferentes usuarios con equipo móvil.

Otra clasificación de estas antenas es el de cambio de haz o patrón de acuerdo a un número constante de haces dentro de una localización fija del sistema de antenas inteligentes de tal manera que el receptor selecciona el haz que le proporcione una mayor potencia e interferencias mínimas. Tal sistema ofrece una menor complejidad y fácil retroalimentación en los sistemas de tecnología de comunicaciones inalámbricas.

La técnica de acceso al medio que utiliza esta tecnología inalámbrica es llamada acceso múltiple por división de código, CDMA que es una hibridación de acceso múltiple por división de tiempo TDMA y acceso múltiple por división de frecuencia FDMA. En donde para el salto o brinco de frecuencia se asegure una secuencia ordenada al ir pasando a través de las ranuras de frecuencia. Para ser más específico durante la ranura de tiempo T1 el usuario 1 ocupa la banda de frecuencia 1, el usuario 2 ocupa la banda de frecuencia 2 y así

sucesivamente. Durante la ranura de tiempo 2 el usuario 1 salta a la banda de frecuencia 3, el usuario 2 ocupa la banda de frecuencia 1 mientras que el usuario 3 ocupa la banda de frecuencia 2.

Una importante ventaja sobre los sistemas TDMA y FDMA es que CDMA proporciona seguridad en la comunicación al evitar traslapes en las señales.

La tecnología de antena inteligente puede mejorar significativamente la ejecución de un sistema inalámbrico y economizar para un rango de usuarios potenciales. Habilita a operadores de PC's, celulares y redes de lazos inalámbricos locales (WLL); para darse cuenta de acrecentamientos significativos en calidad de señal, capacidad y cobertura.

La flexibilidad de tecnología de la antena adaptativa da margen para la creación de nuevos productos de valor agregado y servicios que les dan una ventaja competitiva significativa a los operadores. Son compatibles con toda modulación de interfase área presente.

La idea es, básicamente, ensanchar la señal emitida por los teléfonos móviles, en el espectro de frecuencias, mediante el uso de un código único que puede revertir el ensanchamiento en recepción. Así, cuanto más se ensancha la señal, se requiere menos potencia, pero esta se ve más afectada por las interferencias, es más débil. En estos casos, se usa un factor de ensanchamiento muy alto. Esta situación es la que se da cuando se mantiene una conversación.

Por su parte, las antenas usadas en las estaciones base son antenas adaptativas. Esto significa que estas antenas son capaces de seguir al usuario en su camino variando su orientación, ganancia y directividad. Conforman un haz estrecho que minimiza las interferencias y aumenta la capacidad del

sistema. Para poder efectuar la gran cantidad de procesamiento que estas antenas realizan, están dotadas de DSPs o procesadores digitales de señal.

De tal forma que esta tesis tratara a fondo cada una de las características de una antena inteligente especialmente en la parte del crecimiento espectral pues con ello se mejora muchos parámetros importantes tales como capacidad de canal mas ancho, mayor cobertura agilidad en el proceso entre otros factores.

M.C. Catarino Alor Aguilar

INDICE

| Capítulo | Página |
|---|--------|
| Prólogo | |
| Síntesis | 1 |
| 1. Introducción | 6 |
| 1.1 Descripción del Problema | 6 |
| 1.2 Objetivo de la Tesis | 6 |
| 1.3 Hipótesis | 7 |
| 1.4 Límites del Estudio | 7 |
| 1.5 Justificación del trabajo | 8 |
| 1.6 Metodología | 8 |
| 1.7 Revisión Bibliográfica | 9 |
| 2. Sistemas Radiantes | 10 |
| 2.1 Fundamentos de Antenas | 10 |
| 2.2 Teorema de La Reciprocidad | 11 |
| 2.3 Desarrollo del Dipolo | 13 |
| 2.4 Parámetros de Las Antenas | 15 |
| 2.4.1 Impedancia | 15 |
| 2.4.2 Intensidad de Radiación | 17 |
| 2.4.3 Patrón de Radiación | 19 |
| 2.4.4 Directividad | 22 |
| 2.4.5 Ganancia Directiva | 23 |
| 2.4.6 Polarización de la Onda Plana | 23 |
| 3. Conceptos de Radio Celular | 25 |
| 3.1 Antenas Inteligentes y Acceso Múltiple Por División de Código | 25 |
| 3.2 Separación de Espectro Acceso Múltiple Por División de Código | 28 |
| 3.3 Separación de Espectro Por Secuencia Directa | 29 |
| 3.4 Separación de Espectro por Salto de Frecuencia | 31 |
| 3.5 Conceptos Básicos de Radio Propagación | 32 |
| 3.6 Pérdidas de Trayectoria de Canal en el Mundo Real | 36 |
| 3.7 Pequeña Escala De Atenuación | 36 |

| | |
|--|----|
| 3.8 Pérdidas de Propagación a Gran Escala | 38 |
| 4 Antenas Inteligentes | 39 |
| 4.1 Descripción y Concepto de Antena Inteligente | 39 |
| 4.1.1 Reducción de la Potencia Transmitida | 41 |
| 4.1.2 Reducción de la Propagación por Multitrayecto | 41 |
| 4.1.3 Reducción del Nivel de Interferencia | 41 |
| 4.2 Implementación de un Sistema de Antena Inteligente | 43 |
| 4.2.1 Haz Conmutado | 43 |
| 4.2.2 Haz de Seguimiento | 44 |
| 4.2.3 Haz Adaptativo | 45 |
| 4.2.4 Receptor de Alta Sensibilidad | 46 |
| 4.2.5 Rechazo de Interferencias por Filtrado Espacial | 47 |
| 4.2.6 Acceso Múltiple por División Espacial | 47 |
| 4.3 Algoritmos de Configuración de Haz | 48 |
| 4.3.1 Técnicas Con Referencia Temporal | 49 |
| 4.3.2 Técnicas Con Referencia Espacial | 50 |
| 4.3.3 Técnicas Con Referencia Ciega | 51 |
| 4.3.4 Procesado del Haz Espacial | 51 |
| 4.3.5 Conformador de Banda Ancha | 52 |
| 4.3.6 Conformador en el Dominio de La Frecuencia | 52 |
| 4.3.7 Conformador Digital | 52 |
| 4.3.8 Método de Autoestructura | 52 |
| 4.4 Canales Involucrados | 54 |
| 4.4.1 Canal Dedicado | 54 |
| 4.4.2 Canal de Acceso Dirigido | 54 |
| 4.5 Procesamientos Involucrados | 55 |
| 4.5.1 Sincronización y Búsqueda de Celda | 56 |
| 4.5.2 Control de Potencia | 56 |
| 4.5.3 Establecimiento de Llamadas | 56 |
| 4.5.4 Diversidad | 56 |
| 4.5.5 Localización | 57 |
| 4.5.6 Llamadas | 57 |
| 4.5.7 Relevación | 57 |

| | |
|----------------------------------|----|
| 4.5.8 Sistema de Recepción | 58 |
| 5 Conclusiones y recomendaciones | 59 |
| 5.1 Conclusiones | 59 |
| 5.2 Recomendaciones | 60 |
| Bibliografía | 61 |
| Índice de figuras | 62 |
| Glosario | 63 |
| Apéndice | 64 |
| Resumen autobiográfico | 66 |

SINTESIS

La presente tesis trata sobre el desarrollo de los sistemas de comunicaciones móviles y en especial el desarrollo de la conformación digital del haz o DBF tomando esto como referencia definiremos a la comunicación como la acción de transmitir un mensaje o información mediante un emisor, un medio de transmisión y finalmente un receptor, desde tiempo inmemorial hasta nuestra época actual el hombre ha tenido la necesidad de comunicarse con otras personas o pueblos haciendo uso de múltiples recursos tales como mensajes audibles, mensajes escritos y mensajes visuales, actualmente las comunicaciones se han desarrollado gracias a la tecnología de la comunicación electrónica disponible, utilizando la propagación por el espacio libre como medio de transmisión para propagar señales electromagnéticas, para que esto sea posible se requiere de un elemento capaz de transformar señales de voltaje y corriente en señales electromagnéticas, este elemento es conocido como antena, y empezamos por dar una descripción del comportamiento de las antenas.

La antena transforma la energía de un campo electromagnético estacionario compuesto de cargas (Q) y corrientes (I) producido por la señal de

información, también conocida como banda base, en energía de un campo electromagnético el cual es radiado hacia el espacio circundante en diferentes direcciones.

Anteriormente los sistemas inalámbricos se desarrollaron usando sistemas radiantes fijos con patrones de radiación diseñados para adaptarse a las características de cobertura posibles pero que no son capaces de adaptarse dinámicamente a cambios en la densidad de flujo de información y sus requerimientos. Las antenas inteligentes constituyen un sistema que utiliza un conjunto fijo de elementos en un arreglo donde las señales son combinadas para formar un haz de radiación que se controla utilizando procesamiento tanto analógico como digital de señales de radiofrecuencia en direcciones determinadas por el desplazamiento y la distancia del sistema móvil o el receptor, reduciendo al mínimo los fenómenos degradantes de la señal como el ruido y sus diferentes formas, la interferencia de otras fuentes emisoras y otros factores que degraden la señal.

Uno de los métodos utilizados para alcanzar la calidad en las comunicaciones inalámbricas y reducir los factores en contra es el llamado acceso múltiple por división de código o CDMA el cual permite una gran cantidad de suscriptores que comparten la misma frecuencia y el mismo tiempo por asignación de un código único.

Por otro lado el enlace celular, es hacer que un espectro de frecuencia limitado en potencia principalmente y susceptible conforme se incrementa la separación entre transmisor y receptor a factores que atenúan la señal y a un ancho de banda limitado, pueda estar disponible dentro de un área geográfica dividida en un número de pequeñas células. Las células que están lo suficientemente apartadas una de otra pueden reutilizar el mismo espectro de frecuencia. Los sistemas modernos de CDMA también reutilizan recursos en el espectro entre una célula y otra, en este sistema el usuario se comunica con la

radio base por medio de un conjunto de canales lógicos. Un canal es asignado a un usuario cuando aquel está activo y se libera cuando la unidad portátil termina la llamada o se pasa a otro usuario. Cuando una unidad ha establecido un enlace transmitiendo o recibiendo una señal de voz, datos o fax se dice que está activa. Una unidad móvil cuando está preparada para recibir o para transmitir información, pero no está activamente transmitiendo o recibiendo se dice que está en estado espurio.

Al inicio de las comunicaciones por distribución celular la cobertura era de varios kilómetros, conforme la demanda aumentó, el número de usuarios que podían ser admitidos en un área de cobertura era limitado debido al espectro disponible y a la tecnología de interfaz. Para poder tener una mayor capacidad de usuarios en áreas específicas lo que se hizo es bajar la potencia de la radiobase y reutilizar los canales de frecuencia sobre un área geográfica específica, todo esto se logra utilizando un grupo de antenas con pequeña cobertura llamadas microcélulas con espacios muy cercanos entre ellas obteniendo así una gran capacidad de canal, ahorro en el consumo de energía tanto de la radio base como en el equipo móvil el cual se ve reflejado en la duración de las baterías. Recientemente los sistemas de PCS o sistemas de comunicación personal surgieron con células de unos pocos cientos de metros o incluso más pequeñas.

Otros métodos de acceso al medio son los sistemas de modulación digital, estos son: El acceso múltiple por división de frecuencia CDMA y TDMA o acceso múltiple por división de tiempo. El acceso múltiple por división de frecuencia asigna una banda de frecuencia a un canal mientras dura la conexión, asignar y compartir esa banda de frecuencia de canal a una cantidad importante de usuarios es un principio fundamental de la teoría de las comunicaciones y es que las señales de múltiples usuarios pueden compartir un mismo medio de transmisión si esas señales se pueden hacer ortogonales, en FDMA la ortogonalidad se hace al separar distintos canales en distintas

frecuencias. Para TDMA los canales se hacen ortogonales al separarlos en el tiempo con todos los usuarios utilizando la misma frecuencia. por ejemplo una ranura de tiempo, que se repite una vez por trama, se asigna a cada usuario.

Los canales también pueden adquirir la ortogonalidad al usar secuencias de códigos subyacentes para cada canal, sistema conocido como CDMA o acceso múltiple por división de código. Si separamos un canal de voz sobre un muy amplio ancho de banda veremos que estamos faltando al propósito de la conservación de la frecuencia. Con la separación del espectro, con el poderoso recurso de las propiedades de antiinterferencia, un sistema multiusuario puede transmitir sobre la misma frecuencia con la mínima interferencia, esto supone que cada usuario utiliza una llave variable en el receptor. En el receptor la señal es separada utilizando una correlación que acepta solamente señales de energía de una secuencia de código binario variable desde el transmisor y entonces se esparce por el espectro. CDMA proporciona un incremento en capacidad de quince veces que su análogo de FM, y puede soportar cualquier formato digital a una entrada específica de bit rate tal como facsimil, datos y sistema de paging. En conclusión la cantidad de potencia de transmisor requerida para superar la interferencia es bastante más baja cuando se utiliza CDMA, esto se traduce en ahorro de infraestructura, equipo y una vida más prolongada en las baterías.

La evolución que sufrieron los sistemas radiantes desde el simple dipolo, después los sistemas sectorizados los cuales toman una área y la subdividen en sectores cubiertos por antenas direccionales desde la radiobase donde cada sector se trata como una celda en particular, con estas antenas se incrementa la posibilidad de reuso de canal de frecuencia y son utilizados hasta seis sectores por celda. El siguiente sistema radiante es el de diversidad de sistema el cual incorpora dos antenas en la sección de la radiobase por sector mejorando, por consecuencia los efectos negativos de el traslape de señales. Finalmente surge la antena inteligente, realmente el elemento radiante en sí no

es por sí solo inteligente, mas bien el sistema subyacente es, mediante procesadores digitales capaces de recibir y transmitir mediante la adaptación de la sensibilidad del nivel de recepción y filtrado digital, en otras palabras el sistema es capaz de cambiar automáticamente la direccionalidad de su radiación así como la forma o la apertura espacial del haz proyectado.

Por otra parte el método de Desplazamiento Mínimo Gaussiano GMSK es un esquema de modulación binaria simple que puede ser vista como una derivación de Mínima Desviación de Fase MSK. En GMSK los niveles de lóbulos laterales son reducidos al máximo mediante un proceso de modulación de no regreso a cero NRZ.

INTRODUCCIÓN

1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En los actuales sistemas digitales de comunicación la interferencia, el ruido, la atenuación por propagación en el espacio, la intermodulación provocada por la estrecha separación entre canales ocasiona el desacople de impedancias en el canal de radio frecuencia, un mayor consumo de energía de los equipos en las estaciones radiobase y los equipos de los usuarios, interrupción de la comunicación, son los problemas actuales en las comunicaciones digitales. esto aunado al continuo crecimiento en la demanda de servicios de comunicaciones digitales trae consigo la saturación del ancho de banda en el espectro electromagnético asignado para estos servicios.

1.2 OBJETIVO DE LA TESIS

El objetivo de esta tesis es desarrollar la técnica para la conformación digital del haz de radiación, DBF “Digital Beamforming” en antenas inteligentes, esto es,

lograr que el haz o patrón de radiación de la antena se adapte en frecuencia y en fase a la distancia a la que se encuentre el usuario y lograr patrones de radiación con una eficiencia superior al 86%. Dentro de los objetivos también está diseñar circuitos de acoplamiento de impedancias con elementos distribuidos y concentrados, es decir, elementos electrónicos pasivos como resistores inductores y capacitancias y elementos activos como los semiconductores de la familia de los transistores de efecto de campo que permitan modelar los parámetros de dispersión o parámetros S, estos parámetros son una herramienta matemática que proporciona información acerca de que ganancia, atenuación y reflexión tendrán las señales de información. Con el desarrollo de DBF logramos que la antena por medio de filtraje digital adecue la apertura angular de su haz o patrón de radiación de acuerdo a la potencia de la señal recibida, dicho de otro modo, dependiendo de la distancia entre el equipo móvil y la radiobase es el ancho de haz que la antena ajustará automáticamente.

1.3 HIPÓTESIS

Mi supuesto a ser probado es que el sistema de conformación digital del haz de radiación, DBF, logrará elevar en gran medida la eficiencia en las comunicaciones digitales inalámbricas en varios aspectos: Mejorar la calidad de transmisión/recepción al reducir las interferencias, la intermodulación y las pérdidas por desacoplo de impedancias.

1.4 LÍMITES DEL ESTUDIO

Este estudio se basa en la modulación GMSK "Gaussian Minimum Shift Keying" o Mínimo Desplazamiento Gaussiano consistente en mejorar el nivel de eficiencia en porcentaje de acuerdo a un comportamiento gaussiano de la señal a niveles por arriba de al 86% que es el nivel que brindan los sistemas actuales

de comunicación. El canal gaussiano es considerado como el canal ideal, solamente afectado por el ruido blanco producido por la circuitería interna en el receptor. No se estudiarán otros métodos de filtraje digital ni de modulación, como por ejemplo: modulación en frecuencia (FSK), modulación en fase (PSK), o modulación en cuadratura (QPSK), ya que el método GMSK estudia la modulación en el espacio, además FSK, PSK y QPSK están por debajo del nivel de eficiencia que el obtenido mediante GMSK. Por otra parte la tecnología basada en transistores de potencia de efecto de campo y alto índice de respuesta como los P-HEMT, HEMT y MESFET es aún muy costosa motivo por el que no se incluye en el estudio.

1.5 JUSTIFICACIÓN DEL TRABAJO

El desarrollo de DBF trae como beneficios tanto al proveedor como al usuario final, menos interferencias en los enlaces de comunicación, llamadas continuas, un mayor número de canales disponibles, menor consumo de potencia para el equipo transmisor y para los equipos receptores, mejora en el acoplamiento de impedancias y por consiguiente menos pérdidas, lo cual trae consigo un importante ahorro de recursos económicos para todas las partes involucradas.

1.6 METODOLOGÍA

- Actividad 1. Estudios de conceptos fundamentales de antenas.
- Actividad 2. Estudio de los parámetros básicos de las antenas y el entorno de propagación de la radiación.
- Actividad 3. Estudio de las antenas inteligentes. Desarrollo de algoritmos matemáticos utilizando como herramientas los programas Mat-Lab y PUFF.
- Actividad 4.

Conceptuar la importancia de las antenas inteligentes. Definición de modulación FSK, PSK y QPSK. Estimación de la estación base y los arreglos de distribución celular. Determinación de coberturas y direccionalidad del patrón de radiación utilizando el analizador de espectro digital hp 8753E.

- Actividad 5. Generación y simulación de parámetros utilizando Mat-Lab.
- Actividad 6. Optimización de los parámetros de la antena mediante el software de Mat-Lab y obtener un modelo preliminar del circuito con los parámetros obtenidos en la actividad anterior.
- Actividad 7. Comparación de los datos obtenidos en la actividad anterior mediante Mat-Lab y PUFF.
- Actividad 8. En base al punto anterior diseñar el sistema propuesto como un circuito formado por elementos concentrados y distribuidos.

1.7 REVISION BIBLIOGRÁFICA

Se analizaron diversos estudios de antenas inteligentes en especial los trabajos desarrollados por Theodore S. Rappaport en su libro "Smart Antennas for Wireless Communications", el cual incluye información reciente sobre trabajos y técnicas digitales de acceso al medio. Diseño, fabricación y técnicas de medición de antenas de cinta y microcinta del libro: "Broadband Match Antennas" de Jean-Francois and Fred Gardiol.

2 SISTEMAS RADIANTES

2.1 FUNDAMENTOS DE ANTENAS

Para empezar a hablar acerca del desarrollo de las comunicaciones inalámbricas y en especial de la conformación digital del haz o DBF debemos definir la comunicación como la acción de transmitir un mensaje o información mediante un emisor, un medio de transmisión y finalmente un receptor, desde tiempo inmemorial hasta nuestra época actual el hombre ha tenido la necesidad de comunicarse con otras personas o pueblos haciendo uso de múltiples recursos tales como mensajes audibles, mensajes escritos y mensajes visuales, en la actualidad las comunicaciones se han desarrollado enormemente gracias a la tecnología de la comunicación electrónica disponible, entre estas, las comunicaciones inalámbricas o las que utilizan el espacio libre como medio de transmisión para propagar señales compuestas por campos electromagnéticos arreglados de tal forma que sean aptos para transportar información sin distinción de la cualidad y naturaleza de esta, pero para lograr que esta energía de campos electromagnéticos sea propagada se requiere de un componente físico capaz de transformar señales de voltaje y corriente en señales EM, este elemento físico es conocido como antena.

La antena de transmisión está destinada a la transformación de la energía de un campo electromagnético estacionario con la interacción entre cargas Q y corrientes I ; producido por la señal de información, también conocida como banda base, en energía de un campo electromagnético de radiación el cual es disperso en diferentes direcciones dadas.

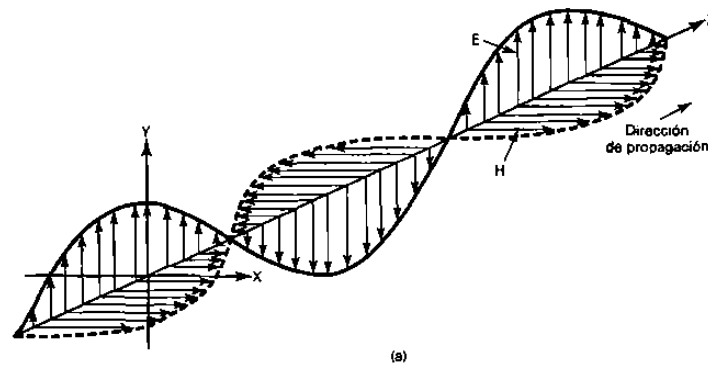


Figura 2.1 Onda electromagnética formando un sistema ortogonal a la dirección de propagación en la dirección de z

2.2 TEOREMA DE LA RECIPROCIDAD

La antena de recepción está destinada a la transformación de la energía de una señal de radio frecuencia en energía de campo estacionario. El carácter de este proceso tiene lugar tanto en antenas transmisoras y receptoras y además atestigua el principio de la reciprocidad que dice que una misma antena puede ser utilizada tanto en recepción como en transmisión. En otras palabras si una fuerza electromotriz (FEM) se aplica a las terminales de una antena A y una corriente es medida en terminales de otra antena B entonces una corriente igual en fase y amplitud ocurre en A si esa misma FEM se aplica a la antena B. Una importante consecuencia de este teorema es el hecho de que bajo estas condiciones los patrones de transmisión y recepción son los mismos.

En los circuitos de la figura 1^a y 1b se muestra como es el comportamiento de una antena en cuanto a su reciprocidad Z_1 y Z_2 en ambas figuras representa la impedancia característica de transmisión y la antena de recepción respectivamente, mientras que Z_3 es la impedancia del medio; V_a y V_b son los voltajes aplicados por la línea de transmisión y las corrientes I_a e I_b son las corrientes inducidas. Cabe aclarar que ambas antenas son idénticas y las tensiones aplicadas son iguales.

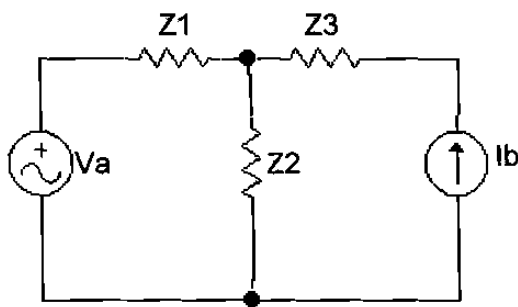


Fig. 2.2a Impedancia de transferencia Z_{ab}

$$I_b = I_1 \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right)$$

$$I_1 = \frac{V_a}{Z_1 + \frac{Z_2 Z_3}{Z_2 + Z_3}}$$

$$I_1 = \frac{V_a (Z_2 + Z_3)}{Z_1 Z_2 + Z_2 Z_3 + Z_1 Z_3} \left(\frac{Z_3}{Z_2 + Z_3} \right) I$$

$$I_b = \left(\frac{V_a}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3} \right) Z_3$$

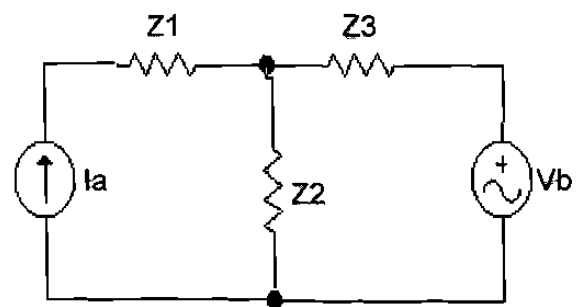


Fig. 2.2b Impedancia de transferencia Z_{ba}

De igual manera para el análisis en I_a tenemos:

$$I_a = \left(\frac{V_a}{Z_1 Z_2 + Z_1 Z_3 + Z_2 Z_3} \right) Z_3 \quad (1)$$

$$I_b = I_a$$

Por lo tanto

$$V_a = V_b$$

Al examinar el comportamiento de la corriente de radiofrecuencia en un conductor encontramos que no toda la energía aplicada a uno de sus extremos alcanzará el otro, algo de esta energía escapa, o mejor dicho se irradia hacia el espacio circundante. Esto es posible explicarlo mediante las ecuaciones de Maxwell lo que permite no solo el calculo de la cantidad de energía sino de su dirección.

2.3 DESARROLLO DEL DIPOLO

En 1873 el matemático James Clerk Maxwell asoció las leyes de Ampere, Faraday y Gauss para campos magnéticos y eléctricos, en un conjunto de cuatro ecuaciones que se denominan las ecuaciones de Maxwell quien unificó la teoría electromagnética.

Para una variación armónica, las formas de un vector giratorio de las ecuaciones integral y diferencial son las siguientes:

| ECUACIONES DE MAXWELL | |
|--|---|
| FORMA INTEGRAL | FORMA DIFERENCIAL |
| $\int H \cdot dL = (\sigma + j\omega\epsilon) \int_S E \cdot dS$ | $\nabla \times H = (\sigma + j\omega\epsilon)E$ |
| $\int E \cdot dL = -j\omega\mu \int_S H \cdot dS$ | $\nabla \times E = -j\omega\mu H$ |
| $\int_S D \cdot dS = \int_V \rho dv$ | $\nabla \cdot D = \rho$ |
| $\int_S B \cdot dS = 0$ | $\nabla \cdot B = 0$ |

Tabla 1

Considerando el circuito abierto de la figura 1.3 se observa que la onda electromagnética se combina para formar un patrón de onda estacionaria con un voltaje en su extremo abierto. Aquí no toda la energía es reflejada de nuevo al circuito, campos cercanos, sino que algo de ella se desprende del conductor. Esto ocurre porque las líneas de fuerza que viajan hacia el circuito abierto

tienen que someterse a una fuerza de fase de onda completa, debido a la inercia, no toda la energía electromagnética es radiada debido a que el espacio circundante representa una carga para la línea de transmisión, por lo tanto se observa un desacoplo de impedancias y porque en bajas frecuencias dos cables paralelos no radian. La solución es alargar el circuito abierto progresivamente con esto se impide la posibilidad de que se cancele la radiación y un mejor acoplamiento entre la línea de transmisión y el medio, es decir una mayor cantidad de potencia es radiada y las ondas viajeras progresivas encuentran mas favorable la transición entre la onda guiada y el medio circundante.

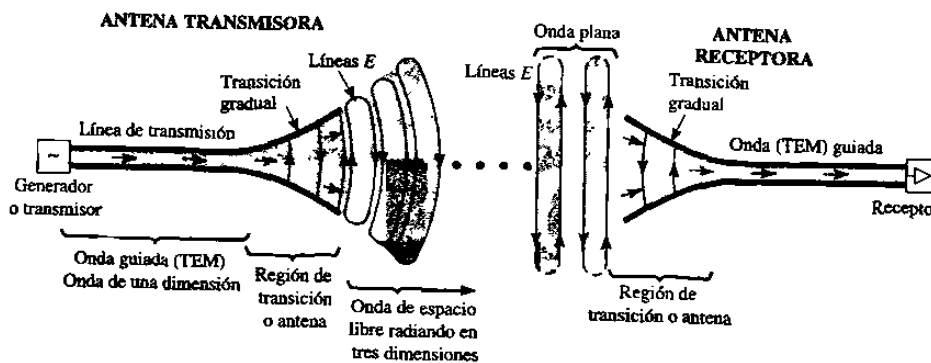


Figura 2.3 Línea de transmisión con transición gradual hacia el dipolo de media onda. Se muestra el desprendimiento de la energía de RF en la antena transmisora y la onda viajera captada por la antena receptora.

La eficiencia de radiación se incrementa aún más al doblar los cables en un ángulo recto, el campo eléctrico y el magnético se acoplan completamente logrando un máximo de radiación. Este tipo de radiador es mejor conocido como dipolo y cuando el total de la longitud de los conductores es de media longitud de onda se conoce como dipolo de media onda. Como se observa en la figura en los extremos de la antena existe una alta impedancia y en el punto donde se conecta con el generador una impedancia muy baja lo que permite una máxima radiación y una baja reflexión.

En una distancia larga del dipolo solo son significativos los términos respecto al inverso de la distancia que involucran campos eléctricos (E_r) y magnéticos (H_ϕ) que representan a los campos distantes del dipolo.

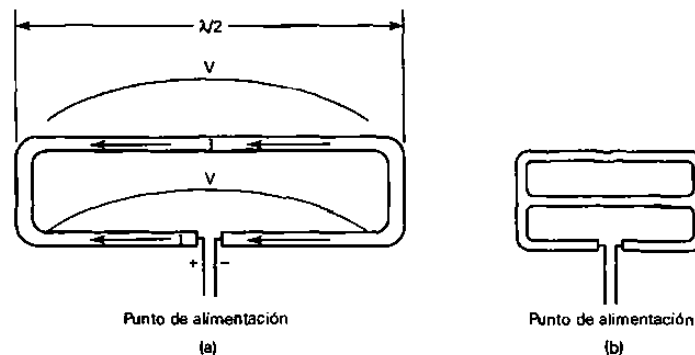


Figura 2.4 a) Dipolo plegado de $\frac{1}{2}$ onda; b) Dipolo plegado de tres elementos

2.4 PARÁMETROS DE LAS ANTENAS

A efectos de definición de los parámetros, conviene diferenciarlos según se relacionen con transmisión o recepción.

2.4.1 IMPEDANCIA

La antena ha de conectarse a un transmisor y radiar el máximo de potencia posible con un mínimo de pérdidas, la antena y el transmisor han de adaptarse para una máxima transferencia de potencia, habitualmente el transmisor se encuentra alejado de la antena y la conexión se hace mediante una línea de transmisión de cobre o por guía de onda debiendo considerarse de ambos su impedancia característica, su atenuación y longitud.

A la entrada de la antena puede definirse la impedancia de entrada Z mediante relaciones tensión-corriente en ese punto, la cual tendrá una parte real Re y una imaginaria $Im(\omega)$, ambas dependientes de la frecuencia. Si Z no

presenta una parte reactiva a una frecuencia, se dice que es una antena resonante. Dado que la antena radia energía, hay una pérdida de potencia hacia el espacio debida a radiación que puede ser asignada a una resistencia de radiación R_r , definida como el valor de la resistencia que disipa ohmicamente la misma potencia que la radiada por la antena.

Superpuestas a la radiación tenemos las pérdidas producirse en la antena, habitualmente óhmicas en los conductores.

La impedancia de entrada condiciona las tensiones de los generadores que se deben aplicar para obtener determinados valores de corriente en la antena y , en consecuencia, una determinada potencia radiada.

Si la parte reactiva es grande, hay que aplicar voltajes grandes para obtener las corrientes requeridas. Si la resistencia de radiación es baja, se requieren elevadas corrientes para obtener una potencia una potencia radiada importante.

Como ejemplo, un caso real, un sistema radiante de onda media para radiar una potencia de 200Kw con una antena de impedancia de entrada $20 - j100$, se requiere una corriente de 100 A y un generador de 10,200 V, si se compensara la parte reactiva mediante una inductancia la tensión del generador sería de solo 2000v.

Si bien en ambas reactancias antena y reactancia seguirán presentes 10,000 V reactivos.

La existencia de pérdidas en la antena hace que no toda la potencia entregada por el transmisor sea radiada, por lo que se puede definir un rendimiento o eficiencia de la antena η , por medio de la relación entre la potencia radiada y la entregada.

$$\eta = \frac{P_{radiada}}{P_{entregada}} = \frac{R_r}{R_r + R_{\Omega}} \quad (2)$$

2.4.2 INTENSIDAD DE RADIACIÓN

Una de las características fundamentales de una antena es su capacidad de radiar en una cierta dirección, es decir, para concentrar la energía radiada en ciertas direcciones en el espacio, en otras palabras, la intensidad de radiación es la potencia radiada por unidad de ángulo sólido en una determinada dirección, sus unidades son voltios por estereorradián¹ como se muestra en la figura 1.3b.

Por lo dicho anteriormente será entonces necesario cuantificar este comportamiento mediante un marco de referencia donde se sitúe la antena, para ello recurrimos al sistema de coordenadas esférico ya que mediante los ángulos θ y Φ , queda definida una dirección en el espacio. En este sistema coordenado se definen los vectores unitarios r , Φ , θ , que forman una base ortogonal de forma que cualquier vector queda expresado como una combinación de los tres vectores unitarios.

¹ Estereorradian: Unidad de ángulo sólido que tiene su vértice en el ecentro de una esfera, limita una área determinada de la superficie de la esfera cuyos lados son el radio de la propia esfera.

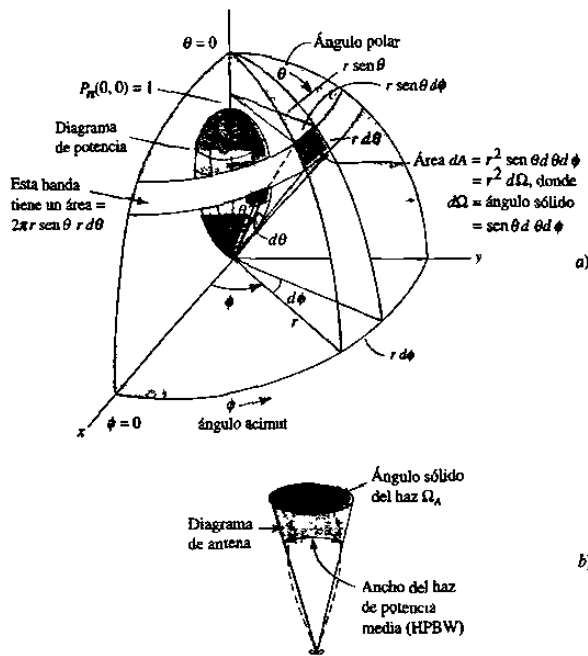


Figura 2.5 a) diagrama de distribución espacial de potencia en coordenadas esféricas con el ángulo $\theta = 0$ con respecto al cenit. b) Diagrama de potencia de la antena y su ángulo sólido o área de haz.

La onda electromagnética radiada se compone de un campo eléctrico $E(V/m)$ y uno magnético $H(A/m)$; a partir de los valores eficaces de los campos se obtiene la densidad de flujo por unidad de área mediante

$$p(\theta, \phi) = \text{Re}(EXH)W / m^2$$

$$Pr = \iint_{4\pi} k(\phi, \theta) d\Omega \quad (3)$$

donde k es la intensidad de radiación y $dw = ds/r^2 = \text{sen}\theta d\theta d\phi$

al ser diferencial el ángulo sólido en coordenadas esféricas

$$d\Omega = ds/r^2 = \text{sen}\theta d\theta d\phi \quad (4)$$

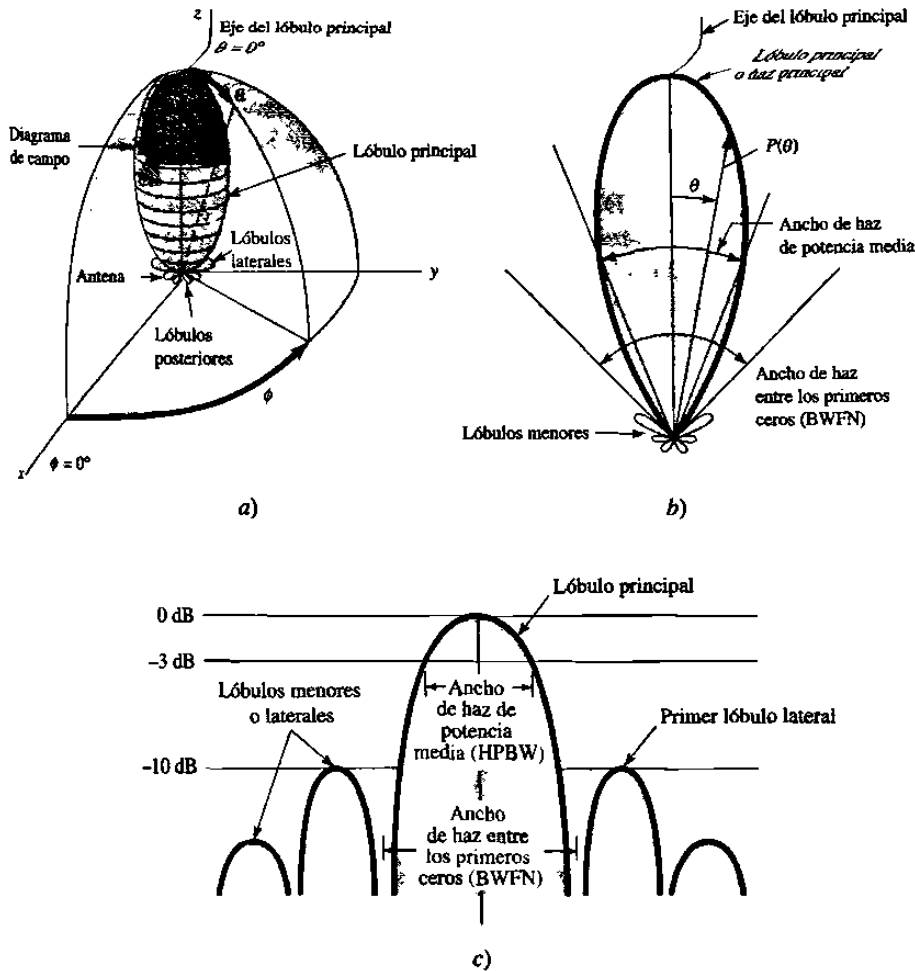


Figura 2.6 a) Diagrama de campo de la antena en coordenadas esféricas. b) Diagrama de potencia de la antena en coordenadas polares. c) diagrama en coordenadas rectangulares y escala decibelimétrica.

2.4.3 PATRÓN DE RADIACIÓN

Un patrón de radiación es una representación gráfica de las propiedades de radiación de una antena, en función de distintas direcciones en el espacio a una distancia fija, como ya se mencionó normalmente se emplean coordenadas esféricas con la antena en el origen y manteniendo el campo eléctrico en función de las variables angulares θ , ϕ . como el campo magnético se deriva directamente del eléctrico, la representación podría realizarse a partir de

cualquiera de los dos, siendo norma habitual que los diagramas se refieran al campo eléctrico.

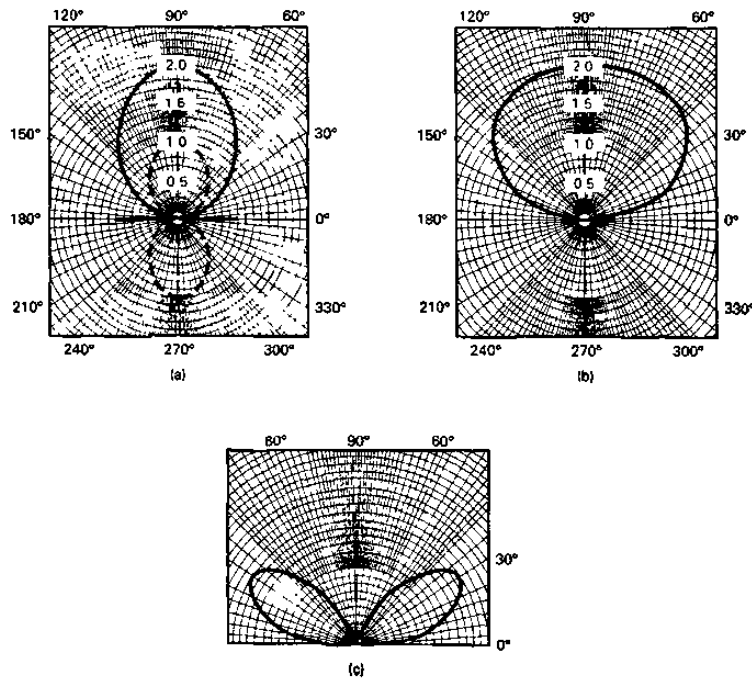


Figura 2.7 Patrón de radiación vertical para un dipolo de $\frac{1}{2}$ onda en coordenadas polares

Al observar a gran distancia una antena, se vería su radiación como si proviniera de un punto, es decir los frentes de onda serían esféricos, a este punto se le denomina centro de fase.

Si bien la información de la radiación es tridimensional, puede ser suficiente representar un corte del diagrama. Los cortes pueden ser los que siguen los meridianos en una hipotética esfera, es decir con ángulo ϕ constante.

Para antenas linealmente polarizadas se define el plano E (campo eléctrico), como el que forma la dirección de máxima radiación del campo eléctrico en esa dirección, en contraparte el plano H es el formado en la dirección de máxima radiación de intensidad de campo magnético, ambos

planos son perpendiculares entre sí y su intersección determina la línea de la dirección de propagación de la antena.

Las secciones bidimensionales del patrón de radiación se pueden representar en coordenadas polares o rectangulares (cartesianas). En el caso de las coordenadas polares el ángulo representa la dirección en el espacio y el radio representa la intensidad de campo eléctrico o la densidad de potencia radiada.

La representación en coordenadas cartesianas permite observar los detalles en antenas muy directivas, mientras que el diagrama polar proporciona una información más clara de la distribución de potencia en el espacio.

En un diagrama de radiación típico, como los que se muestran en la figura 1.5 se aprecia una zona en la que la radiación es máxima, a la que se le llama haz principal o lóbulo principal. Las zonas que rodean a los máximos de menor amplitud se denominan lóbulos secundarios.

El ancho de haz a -3dB , es la separación angular en las que el diagrama de radiación de potencia toma el valor mitad del máximo también denominado como puntos de media potencia (fig. 1.4b y 1.4c)

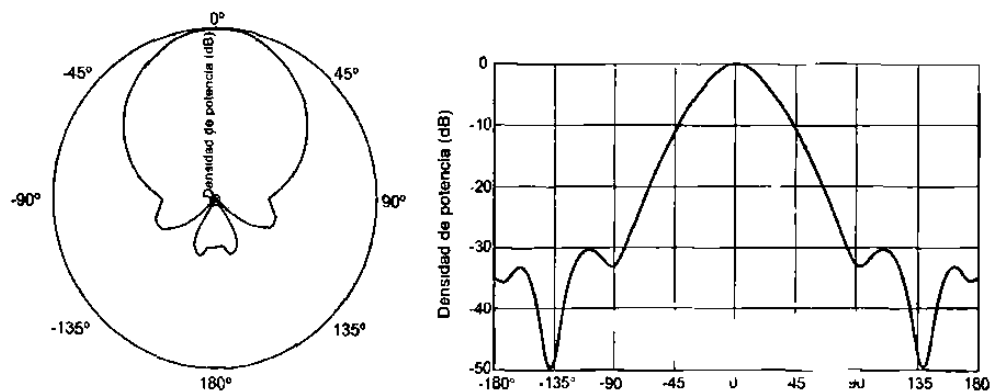


Figura 2.8 diagramas de patrón de radiación en coordenadas polar y rectangular respectivamente.

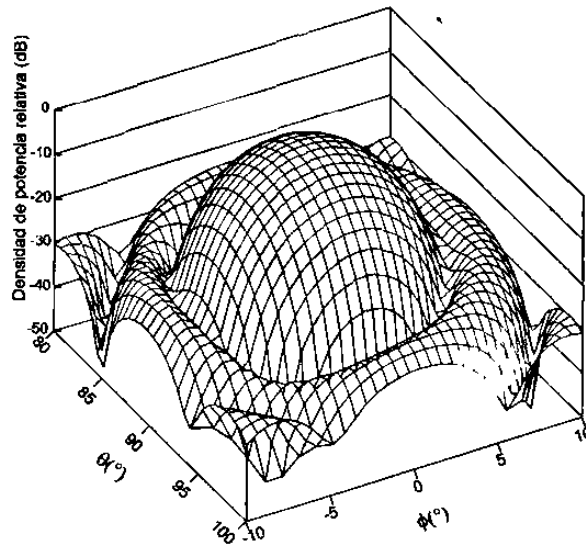


Figura 2.9 Diagrama de radiación tridimensional, estos diagramas proporcionan una gran cantidad de información pero también poseen una mayor complejidad.

La relación del lóbulo principal a secundario es el cociente expresado en decibeles entre el valor del diagrama en la dirección de máxima radiación y en la dirección del máximo secundario, normalmente se refiere al lóbulo secundario de mayor amplitud.

Si un diagrama de radiación presenta simetría de revolución alrededor de un eje se dice que es una antena omnidireccional y toda la información contenida en el diagrama tridimensional puede representarse en una sección que contenga al eje.

2.4.4 DIRECTIVIDAD

La directividad D , de una antena se define como la relación de la densidad de potencia radiada en una dirección y la densidad de potencia que radiaría una antena isotrópica, se denomina antena isotrópica a una antena ideal que radie la misma intensidad de radiación en todas direcciones en el espacio.

$$D = \frac{1}{4\pi} \iint P(\theta, \phi) d\Omega \quad (5)$$

$$D = \frac{4\pi}{\Omega_A}$$

La ecuación anterior expresa la directividad de una antena con respecto a un ángulo sólido de una región específica esferoidal de radiación donde $P(\theta, \phi)$ es la intensidad de radiación por unidad de ángulo sólido. De esta ecuación se deduce que entre menor sea el ángulo sólido mayor será la directividad de la antena.

2.4.5 GANANCIA DIRECTIVA

La ganancia de una antena depende de la directividad y la eficiencia, si la eficiencia no es del cien por ciento, la ganancia será menor que la directividad. La ganancia directiva queda definida por

$$G = KD \quad (6)$$

Donde K es la eficiencia de la antena. La eficiencia de una antena está dada por la relación entre la apertura efectiva y la apertura física.

2.4.6 POLARIZACIÓN DE LA ONDA PLANA

La polarización es una indicación de la orientación del vector de campo en un punto fijo del espacio al transcurrir el tiempo.

La polarización de una antena es la figura geométrica descrita, al transcurrir el tiempo, por el extremo del vector de campo eléctrico en un punto fijo del espacio en el plano perpendicular a la dirección de propagación. Para ejemplificar lo anteriormente descrito considere una onda plana viajando en dirección del eje Z con el campo eléctrico en todo momento en la dirección del

eje y . Se dice que esta onda está polarizada linealmente. Observe que se produce una polarización lineal cuando la diferencia de fase es de π radianes. Como una función del tiempo y posición, el campo eléctrico está dado por:

$$E_y = E_2 \text{sen}(\omega t - \beta z) \quad (7)$$

En general esta onda puede tener componentes en y y en x , en esta situación, con una diferencia de fase δ entre las componentes, se dice que la onda esta polarizada elípticamente describiendo una elipse de polarización, para una polarización circular, $E_1 = E_2$, las amplitudes de ambas componentes y sus ases difieren en $\pi/2$ o $3\pi/2$ radianes.

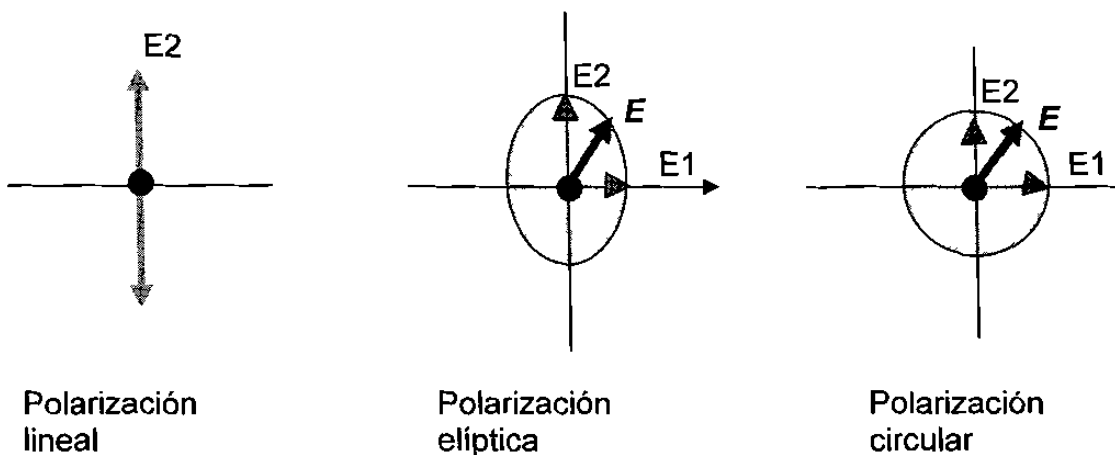


Figura 2.10 Diagrama de polarización de onda con el eje z saliendo del origen hacia afuera de la página. La onda de polarización circular esta polarizada a la izquierda o aproximándose al lector.

3. CONCEPTOS DE RADIO CELULAR

3.1 ANTENAS INTELIGENTES Y ACCESO MULTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO

En el pasado los sistemas inalámbricos fueron desarrollados usando sistemas radiantes fijos cuyos patrones de radiación eran cuidadosamente calculados y diseñados para aproximarse a las características de cobertura posibles pero que no pueden adaptarse dinámicamente a cambios en el tráfico y sus requerimientos. Las antenas inteligentes representan una nueva tecnología para sistemas inalámbricos que utiliza un conjunto fijo de elementos en un arreglo donde las señales de esos elementos son combinados para formar un haz de radiación que pueda ser gobernado utilizando procesamiento digital de señales o elementos de radio frecuencia a una dirección deseada de acuerdo al movimiento del sistema móvil del suscriptor, mientras se minimiza el impacto del ruido, interferencia y otros efectos que degraden la señal.

CDMA es una nueva tecnología que permite una gran cantidad de suscriptores que comparten la misma frecuencia y el mismo tiempo por asignación de un código único.

El concepto de enlace celular es hacer que un espectro de frecuencia finito o un ancho de banda esté disponible a través de un área geográfica dividida en un número de pequeñas células. Las células que están lo suficientemente apartadas una de otra pueden reutilizar el mismo espectro. Los sistemas modernos de CDMA también reutilizan recursos en el espectro entre una célula y otra, en este sistema el usuario se comunica con la radio base por medio de un conjunto de canales lógicos los mismos que son utilizados también por sistemas de "pagina" acceso y tráfico telefónico. Un canal es asignado a un usuario cuando aquel esta activo y se libera cuando la unidad portátil termina la llamada o se pasa a otra célula. Cuando una unidad ha establecido un enlace transmitiendo o recibiendo una señal de voz, datos o fax se dice que esta activa. Una unidad móvil cuando está preparada para recibir o para transmitir, pero no esta activamente transmitiendo o recibiendo se dice que esta en estado espurio.

Al inicio de los sistemas radiocelulares el radio de cobertura era bastante grande, incluso de varios kilómetros, conforme la demanda se incrementó. El número de usuarios que podían ser admitidos en un área de cobertura es limitado debido al espectro disponible y a la tecnología de interface. Para poder tener una mayor capacidad de usuarios en áreas específicas lo que se hizo es bajar la potencia de la radiobase y reutilizar el espectro mas frecuentemente sobre un área geográfica específica, todo esto se logra utilizando células muy pequeñas o microcélulas con espacios muy cercanos entre ellas obteniendo así una gran capacidad. Recientemente los sistemas de comunicación personal surgieron con células de unos pocos cientos de metros o inclusive mas pequeñas para cubrir una porción de un edificio mediante las llamadas picocelulas.

Los sistemas bajo los cuales se estudia la modulación digital son el FDMA o acceso múltiple por división de frecuencia y TDMA o acceso múltiple por división de tiempo. El acceso múltiple por división de frecuencia asigna una banda de frecuencia a un canal mientras dura la conexión. El asignar y compartir esa banda de frecuencia de canal a una cantidad importante de usuarios, un principio fundamental de la teoría de las comunicaciones es que las señales de múltiples usuarios pueden compartir un mismo medio de transmisión si esas señales se pueden hacer ortogonales, en FDMA la ortogonalidad se hace al separar distintos canales en distintas frecuencias. Para TDMA los canales se hacen ortogonales al separarlos en el tiempo con todos los usuarios utilizando la misma frecuencia. por ejemplo una ranura de tiempo, que se repite una vez por trama, se asigna a cada usuario

Los canales también pueden adquirir la ortogonalidad al usar secuencias de códigos subyacentes para cada canal, sistema conocido como CDMA o acceso múltiple por división de código. Si separamos un canal de voz sobre una muy amplio ancho de banda veremos que estamos faltando al propósito de la conservación de la frecuencia. Con la separación del espectro, con el poderoso recurso de las propiedades de antiinterferencia, un sistema multiusuario puede transmitir sobre la misma frecuencia con la mínima interferencia, esto supone que cada usuario utiliza una llave variable en el receptor. En el receptor la señal es separada utilizando una correlación que acepta solamente señales de energía de una secuencia de código binario variable desde el transmisor y entonces se esparce por el espectro. CDMA proporciona un incremento en capacidad de quince veces que su análogo de FM, y puede soportar cualquier formato digital a una entrada específica de bit rate tal como facsímil, datos y sistema de paging. en conclusión la cantidad de potencia de transmisor requerida para superar la interferencia es bastante más baja cuando se utiliza CDMA, esto se traduce

en ahorro de infraestructura, equipo y una vida más prolongada en las baterías.

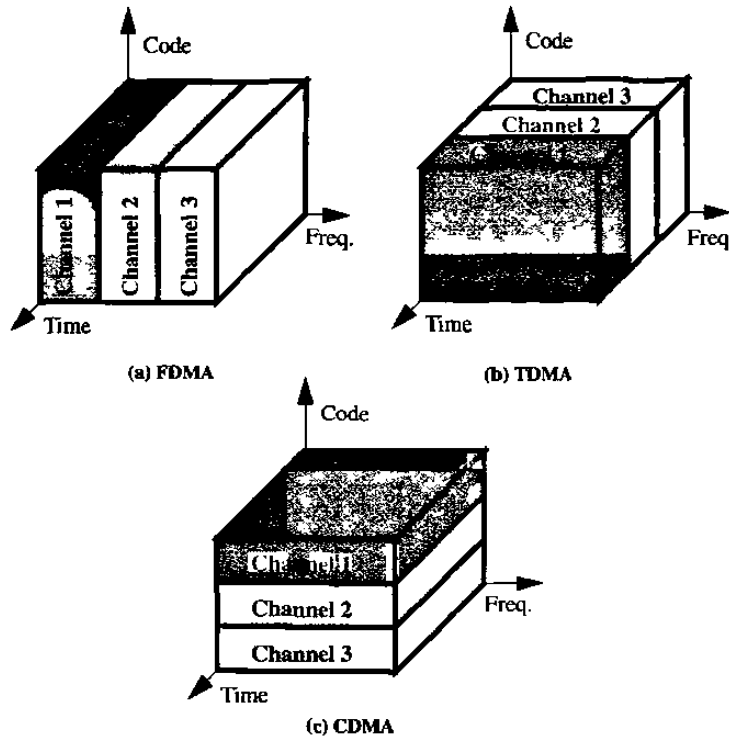


Fig 3.1 Tres esquemas de acceso múltiple; (a) Acceso Múltiple por División de Frecuencia (FDMA) en la cual los tres canales tienen asignada una frecuencia diferente; (b) Acceso Múltiple por División de Tiempo (TDMA), donde cada canal ocupa alternadamente una ranura en el tiempo; (c) Acceso Múltiple por División de Código (CDMA) donde cada canal tiene asignado una secuencia de código único.

3.2 SEPARACIÓN DE ESPECTRO Y ACCESO MÚLTIPLE POR DIVISIÓN DE CÓDIGO

Tradicionalmente en radiocomunicación, la portadora se modulaba usando técnicas que minimizaban el ancho de banda para conservar recursos del espectro, esto se debió a que un solo canal ocupaba una cierta banda de frecuencia, si las frecuencias se transmiten ahora en múltiples bandas de frecuencia no traslapadas, no interferirán con los canales aledaños, con la

consecuente obtención de potencias más elevadas con respecto al ruido el cual siempre está presente en cualquier canal de transmisión.

En el acceso múltiple por división de código y separación de espectro más que tratar de minimizar el ancho de banda de la señal modulada el propósito es formar una señal modulada que ocupe una gran cantidad de ancho de banda, para ello existen dos sistemas de separación de espectro: por secuencia directa (DS) y por salto de frecuencia.

3.3 SEPARACIÓN DE ESPECTRO POR SECUENCIA DIRECTA

En este sistema una señal de banda angosta con información de ancho de banda B_1 es multiplicado por una señal con un ancho de banda muy grande el cual es llamado señal separada, las dos características esenciales de DS son que

- El ancho de banda de la señal separada es mucho más grande que el ancho de banda de la señal de información.
- La señal separada es independiente de la señal de información.

Para ilustrar la operación de DS consideraremos una señal de información $b(t)$, la señal puede ser de voz o datos, asumimos que $b(t)$ es una señal digital compuesta de una secuencia de símbolos b_j con una duración T_s

$$b(t) = \sum_{j=-\infty}^{\infty} b_j \Psi\left(\frac{t - jT_s}{T_s}\right) \quad (1)$$

donde $\psi(t/T)$ es la función de pulso unitario:

$$\Psi(t/T) = \begin{cases} 1 & -0 \leq t \leq T \\ 0 & \end{cases}$$

Esta señal es multiplicada por una secuencia $a(t)$ la cual está compuesta de una secuencia de chip

$$a(t) = \sum \sum a_i \Psi(t - (i + jM)T_c) / T_c \quad (2)$$

donde T_c es el período de chip y M es el número de señales de ruido, $a(i) = 1$
La señal multiplicada $a(t)b(t)$ es convertida a señal portadora

$$s(t) = a(t)b(t)\cos(\omega_c t) \quad (3)$$

En el receptor una replica de la secuencia $a(t - \tau_0)$ es generado cuando τ_0 es un tiempo aleatorio entre uno y MT , para conjuntar nuevamente la señal en el receptor se utiliza un sistema de DLL "Delay Locked Loop" retraso de bloqueo de lazo o por medio de "Phase Locked Loop" lazo de amarre de fase que permiten crear una copia de la portadora, $\cos(\omega_c T)$.

Usando estas cantidades mediante un proceso estadístico forma la señal recibida por el ruido local en una secuencia

$$\begin{aligned} Z_j &= \int_{jT_s}^{(j+1)T_s} r(t)a(t)\cos(\omega_c t) dt \\ &= \int_{jT_s}^{(j+1)T_s} [Ab(t)a(t)\cos(\omega_c t) + n(t)]a(t)\cos(\omega_c t) dt \end{aligned}$$

Asumimos que $a(t)a(t) = 1$, entonces:

$$\begin{aligned}
Z_j &= \int_{jT_s}^{(j+1)T_s} [Ab(t)\cos^2(\omega_c t) + n(t)a(t)\cos(\omega_c t)] dt \\
&= \int_{jT_s}^{(j+1)T_s} \left[A \left(\sum b_i \Psi \left(\frac{t - iT_s}{T_s} \right) \right) \cos^2(\omega_c t) + n(t)a(t)\cos(\omega_c t) \right] dt \\
&= Ab_j \left(\frac{T_s}{2} + \frac{1}{4\omega_c} (\sin(2\omega_c(j+1)T_s) - \sin(2\omega_c jT_s)) \right) + \eta
\end{aligned} \tag{4}$$

Donde η representa la influencia de ruido de canal en el proceso estadístico, suponemos que la frecuencia portadora es relativamente grande con respecto al recíproco del periodo de bit, entonces

$$Z_j = \frac{Ab_j T_s}{2} + \eta \tag{5}$$

Por lo tanto, la decisión estadística, Z_j , es un estimado b_j del símbolo b_j transmitido.

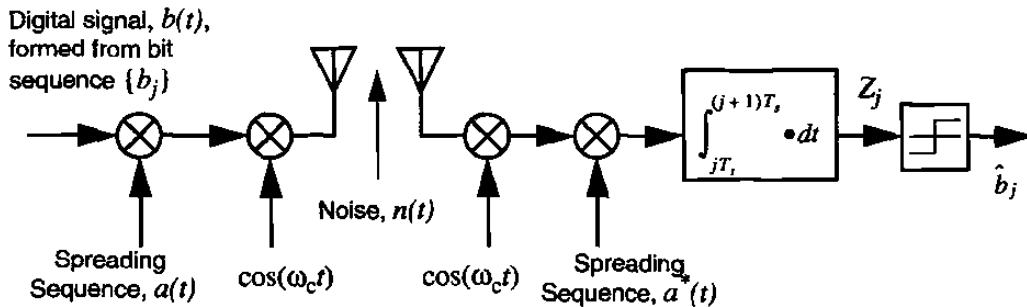


Figura 3.2 Secuencia de la difusión de espectro en transmisor y receptor

3.4 SEPARACIÓN DE ESPECTRO POR SALTO DE FRECUENCIA

Una alternativa a la secuencia directa es la separación de espectro por salto de frecuencia (FH-SS) en muchas formas este sistema es muy similar al

sistema FDMA en la que el ancho de banda disponible para sistema multiusuario es dividido en N número de canales. En cualquier instante en el tiempo una porción de la señal para un usuario en particular utiliza una porción simple del canal. La diferencia entre este sistema y FDMA es que el cambio de la señal por el salto en frecuencia cambia precisamente la frecuencia de la señal portadora o brinca en intervalos muy rápidos. Si el salto de la señal esta muy cercano al rango, el sistema es llamado como un sistema de alta frecuencia, si el salto ocurre a un rango bajo es llamado como salto de baja frecuencia. La secuencia de ranuras de frecuencia ocupadas por ocupado por la señal de FH es una seudo secuencia aleatoria. La secuencia se repite en el receptor el cual se sintoniza a un canal apropiado para adaptar la señal recibida.

Si dos usuarios utilizan el mismo canal cada uno usa una secuencia aleatoria de canal, la señal será ocasionalmente transmitida en la misma ranura de frecuencia.

3.5 CONCEPTOS BÁSICOS DE RADIOPROPAGACIÓN

En antenas de alta directividad, como por ejemplo las antenas parabólicas, las antenas tipo corneta o las antenas de tipo planar existe un parámetro que relaciona directamente a la potencia de transmisor con la ganancia de la antena, este parámetro es conocido como PIRE o potencia isotrópica radiada efectiva, esto es, la antena receptora presenta un cierto incremento de potencia y registra a la antena transmisora como un transmisor de mayor potencia.

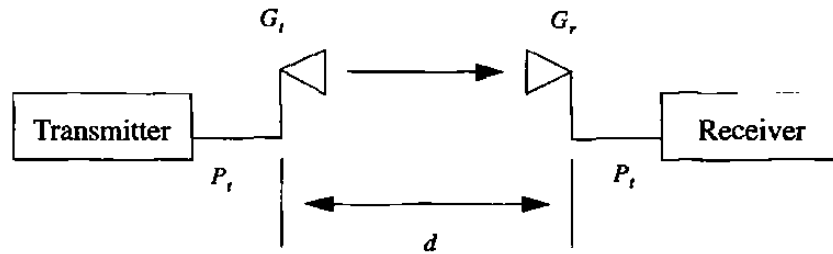


Figura 3.3 Modelo básico de un sistema inalámbrico de comunicación

El PIRE está dado por

$$\text{PIRE} = (P_t)(G_t)$$

en forma decibélica

$$\text{PIRE} = 10\text{Log}(P_t) + 10\text{Log}(\eta) + 20\text{Log}(\pi D/\lambda) \quad (6)$$

donde G_t representa a la ganancia de antena transmisora, en este caso, de una antena de alta directividad.

$$G_t = \eta(\pi D/\lambda)^2 \quad (7)$$

consideremos el enlace inalámbrico de la figura 3.3, se tiene un transmisor que produce una señal de RF con un apotencia promedio en el tiempo P_t , utilizando una antena con una ganancia G_t , y en el lado del receptor una antena con una ganancia G_r , suponemos que las antenas transmisora y receptora apuntan directamente y están correctamente alineadas por lo tanto podemos establecer una ecuación para la potencia de recepción

$$P_r = \frac{G_r P_t A_e}{4\pi d^2} \quad (8)$$

$$P_r = \frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi d)^2}$$

donde A_e es la apertura efectiva de la antena

$$A_e = \frac{\lambda^2 G_t G_r P_t}{(4\pi d)^2} \quad (9)$$

Esta última expresión corresponde a la ecuación de Friis para el espacio libre. La potencia de transmisión es medida en watts y la longitud de onda en metros. Lógicamente es más conveniente trabajar estas cantidades en decibelés.

$$Pr, dBm = PtdBm + GtdBi + GrdBi - 20\text{Log}\left(\frac{4\pi f d}{c}\right) - 20\text{Log}(d) \quad (10)$$

aquí Pr y Pt son medidos en dBm, Gt y Gr están en dBi, d es la distancia entre antenas medida en metros, f es la frecuencia de la señal portadora medida en hertz y c es la velocidad de la luz en metros sobre segundo, a lo largo de esta tesis nos referiremos a los niveles de potencia y ganancia en decibelés.

La ecuación (10), tiene una importante implicación para las comunicaciones inalámbricas y para un adecuado rendimiento o efectividad del radioenlace con un mínimo nivel de potencia en el receptor dado en particular por la separación entre transmisor y receptor y una frecuencia de operación, aquí hay tres formas de incrementar la potencia de recepción, una es incrementar la potencia de transmisor, ahora si el transmisor es portátil el aumento en la potencia reduce la vida de la batería y en transmisores de potencia esto resulta muy costoso y voluminoso, alternativamente podemos incrementar la ganancia de las antenas transmisora o receptora.

En el extremo del usuario de un equipo móvil la ganancia de antena esta limitada a varios factores, usualmente las antenas son pequeñas y deben tener una adecuada orientación factor que no se observa por el usuario debido a que no son antenas direccionales. el tercer factor es que la

ganancia de antena esta limitada a las dimensiones de esta, por lo tanto los equipos portátiles se ven seriamente limitados a la obtención de buenas ganancias. Como ejemplo, supongamos que se requiere de una ganancia de 6dBi se requiere para operar a 1900 Mhz, con esto encontramos que se requiere de por lo menos de 80 cm², de apertura de antena esto es mucho más que el área de un tranceptor móvil moderno, a excepción de las unidades instaladas en carros edificios y residenciales donde se usan antenas más grandes.

Para estaciones base utilizando antenas convencionales con patrones de radiación fijos, ganancias que están entre 60 y 20 dBi debido a que las estaciones base poseen suministros de energía eléctrica suficientemente grandes lo que permite una potencia de cobertura suficiente para su demanda. Las antenas inteligentes ofrecen un mejoramiento al proporcionar patrones dinámicos de las antenas.

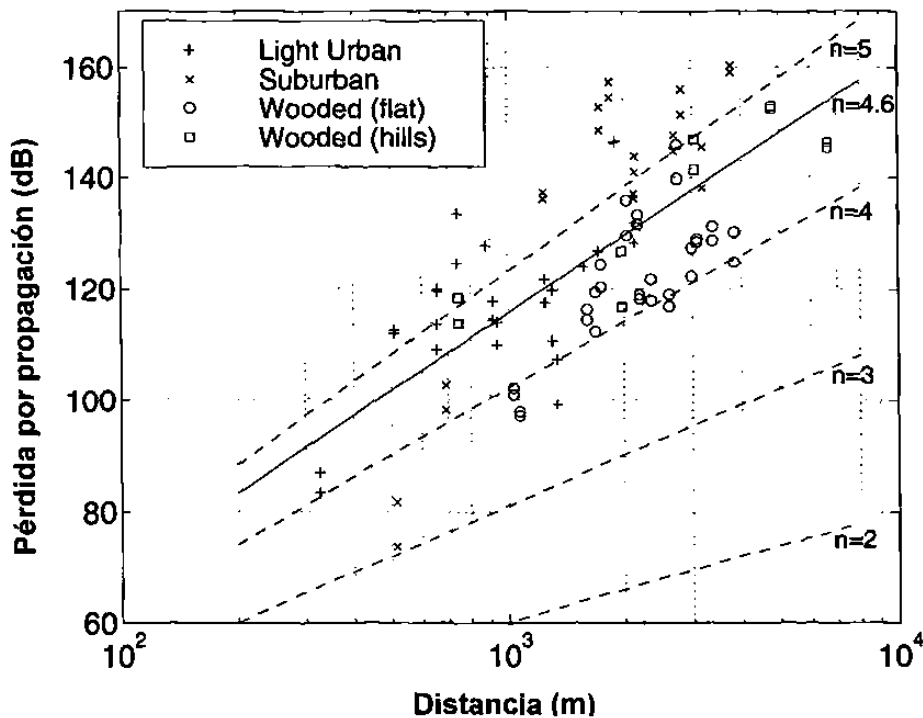


Fig 3.4 Gráfica de la pérdida por propagación contra distancia a una frecuencia de 1900 MHz para medición del rendimiento de una microcélula con una altura de antena de 13 mts. y un transmisor móvil con una antena de 1.5 mts.

3.6 PÉRDIDAS DE TRAYECTORIA DE CANAL EN EL MUNDO REAL

Los fenómenos electromagnéticos que ocasionan las pérdidas por trayectoria son diversos y pueden generalmente ser atribuidos a la reflexión, difracción, y dispersión de la energía radiada y más en sistema de radio celular donde la comunicación muy pocas veces es por línea de vista y donde, en áreas urbanas, la pérdida por reflexión y difracción es ocasionada por grandes estructuras arquitectónicas lo que trae consigo que la onda electromagnética viaje por diferentes trayectorias con el consecuente decremento en la fuerza de la señal.

Los modelos recientes se enfocan en la predicción del nivel promedio de potencia de la señal recibida, estos modelos son llamados modelos de propagación a gran escala.

por otro lado los modelos de propagación que se caracterizan por la rápida fluctuación del nivel de señal recibida sobre una muy corta distancia o una corta duración son llamaos modelos de pequeña escala de atenuación.

3.7 PEQUEÑA ESCALA DE ATENUACIÓN

Con un móvil desplazandose muy pequeñas distancia, la fuerza instantánea de recepción fluctúa rápidamente, dando lugar a que se incremente levemente la atenuación. La razón es que la suma de muchas señales procedentes de diferentes caminos entran en recepción. Esta suma varía ampliamente. por ejemplo una señal de onda continua o de banda angosta obedece a la distribución de atenuación de Rayleigh, en pequeña escala de atenuación, la potencia de la señal de banda angosta recibida puede variar tanto como tres o cuatro veces en magnitud (20 o 30 dB) cuando el receptor

es movido solo una fracción de longitud de onda. El promedio de la potencia de la señal será constante sobre la distancia de varios metros.

Conforme el móvil se aleja del transmisor a mayor distancia, el promedio de la potencia de recepción irá gradualmente decreyentandose, esto es el promedio del nivel de señal local que es predicho en modelos a gran escala de propagación. Típicamente, el promedio de potencia de recepción esta compuesto por los promedios de las mediciones de las señales sobre pasos de cinco a cuarenta longitudes de onda en áreas locales. Para celular y PCS en frecuencias de 1 GHz hasta 2GHz (banda L) corresponde a mediciones de movimientos entre 1 y 10 mts.

En banda ancha el sistema CDMA donde el ancho de banda de RF excede al ancho de banda de canal en forma coherente, la señal recibida se dispersa mucho menos que una señal de banda angosta como se muestra en la figura 3.5

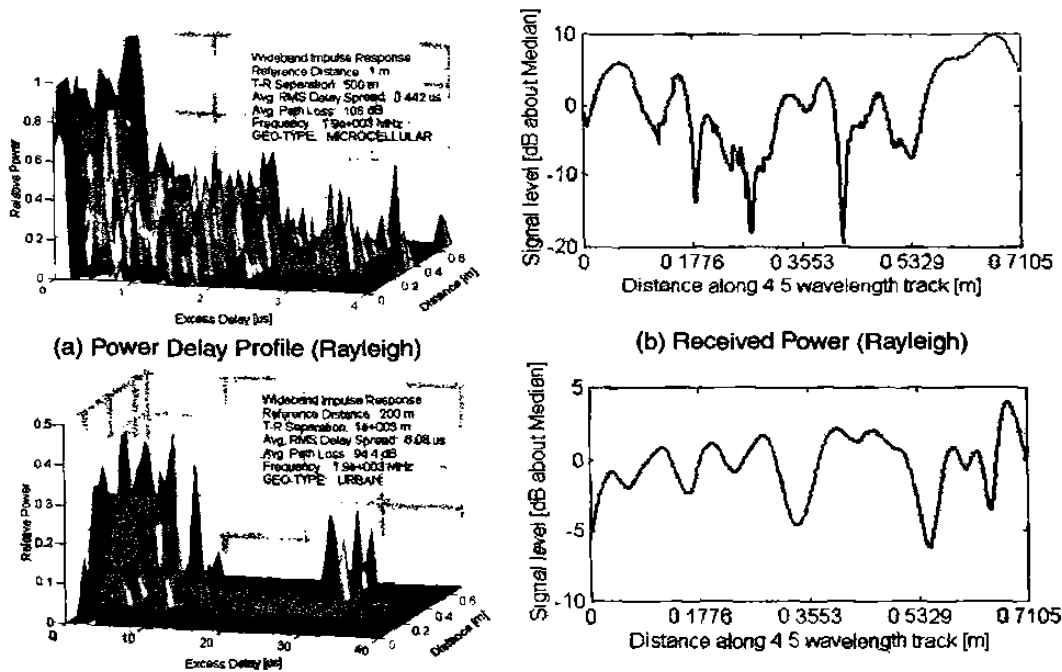


Figura 3.6 Gráficas que muestran el retraso en la potencia en trazos de longitudes de onda con un receptor desplazandose 0.6 mts. En un medio de esparcimiento de Rayleigh (a) y (b) y Riecan (c) y (d)

3.8 PÉRDIDAS DE PROPAGACIÓN A GRAN ESCALA

A una mayor escala de modelos de radio propagación modelos son derivados de una combinación de métodos analíticos y empíricos. Los métodos empíricos se basan en la caracterización de curvas de expresiones que recrean un conjunto de mediciones de datos en un determinado medio ambiente. Estas aproximaciones tienen la ventaja de tener la simplicidad dentro de una cantidad de factores de propagación.

Con el tiempo algunos modelos de propagación emergan los cuales son ahora usados para predecir coberturas a gran escala de sistemas de comunicación inalámbricos.

Usando los modelos de pérdidas de propagación para estimar los niveles de señal como una función de la distancia, se vuelve posible predecir la relación portadora a ruido para sistemas de comunicaciones móviles.

4 ANTENAS INTELIGENTES

4.1 DESCRIPCION Y CONCEPTO DE ANTENA INTELIGENTE

Se trata de una red de antenas capaz de ubicar a los usuarios con gran certeza, lo cual reduce la interferencia y permite un uso más eficaz del espectro, así pueden entrar más personas dentro de la red celular al mismo tiempo, aumentando la capacidad del sistema. Todo ello reduciría sensiblemente los costos. Una antena inteligente (en las figura 4.1 se muestran dos prototipos) es aquella que, en vez de disponer de un diagrama de radiación fijo, es capaz de generar o seleccionar haces muy directivos enfocados hacia el usuario deseado, e incluso adaptarse a las condiciones radioeléctricas en cada momento. Existen varias formas de implementar un sistema radiante con estas características, como se detalla a continuación.

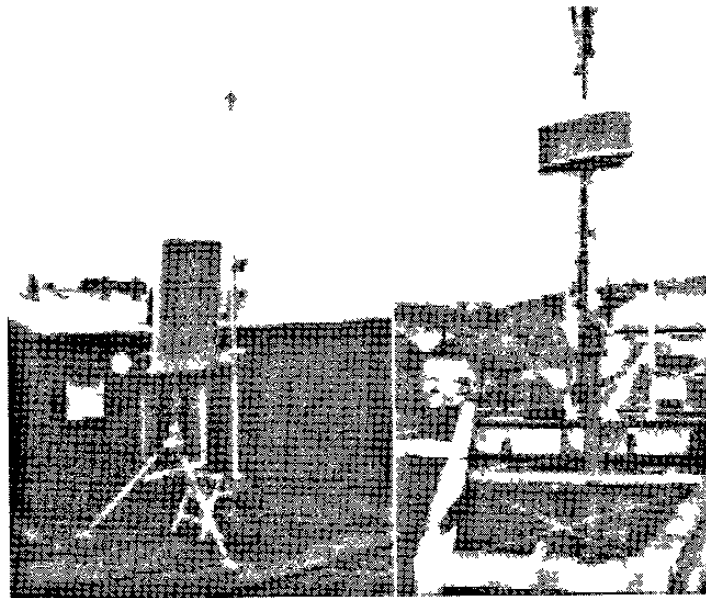


Figura 4.1 Prototipos de Antena Inteligente de la firma Allgon

La implantación de antenas inteligentes en una red de comunicaciones móviles se limita en principio, a las estaciones base (o nodos), debido a que necesariamente se deben emplear sistemas radiantes de mayor tamaño (*arrays* de varios elementos). Esto tiene la ventaja añadida de que pueden introducirse las antenas inteligentes de forma transparente para los usuarios, que no tendrán que cambiar de terminal para beneficiarse de esta tecnología. No obstante, algunos autores si han contemplado la posibilidad de incorporar antenas inteligentes a los terminales móviles.

La característica de las antenas inteligentes de tener unos de radiación con una mayor directividad (es decir, mayor ganancia y mayor selectividad angular), hace pensar en las siguientes ventajas potenciales de estos sistemas. Incremento de la zona de cobertura. Dado que la ganancia es mayor que en el caso de antenas omnidireccionales o sectorizadas, para igual potencia transmitida, la señal se podrá recibir a una mayor distancia. Este hecho podría permitir reducir el número de estaciones base necesarias para cubrir una zona, siempre y cuando no sea el tráfico el factor limitante.

4.1.1 REDUCCIÓN DE LA POTENCIA TRANSMITIDA

La mayor ganancia de la antena permitirá incrementar la sensibilidad de la estación base, por lo que los móviles podrán transmitir con menor potencia, ahorrando batería. De igual modo, gracias a la ganancia del *array* es posible que la estación base transmita igual potencia, pese a que cada elemento del *array* esté radiando una potencia muy inferior. Así, se relajarían las especificaciones sobre los amplificadores de potencia utilizados, que podrían resultar más baratos.

4.1.2 REDUCCIÓN DE LA PROPAGACIÓN MULTITRAYECTO

Debido a la menor dispersión angular de la potencia radiada por la estación base, se reducirá el número de trayectos múltiples que alcanzarán al móvil (mejorando así las características de dispersión de retardo del canal). Esto permitirá relajar los requisitos exigidos al ecualizador del terminal móvil. En el caso del enlace ascendente, la antena inteligente de la estación base podría discriminar las componentes multitrayecto de la señal recibida desde el móvil, o incluso explotarlas (Mediante receptores 2D-Rake, por ejemplo.) Esto dependerá de la configuración de la antena escogida.

4.1.3 REDUCCIÓN DEL NIVEL DE INTERFERENCIA

La mejor selectividad espacial de la antena permitirá a la estación base discriminar las señales de usuarios interferentes a favor de la señal del móvil deseado (En el caso del enlace ascendente), también reducir el nivel de potencia transmitida en las direcciones de esos otros usuarios (En el caso del enlace descendente). De cualquier modo, se conseguiría aumentar la relación C/I, lo cual tiene dos consecuencias fundamentales: Una mejora en la C/I implica directamente una mejora en la tasa de error (BER), lo que hace que la calidad del servicio aumente.

La reducción de la C/I puede explotarse directamente (mediante técnicas de multiplexión espacial) o indirectamente (realizando un plan de frecuencias más ajustado, en el caso de GSM) para aumentar la capacidad del sistema.

Mejora de la seguridad. Gracias a que la transmisión entre la estación base y el terminal móvil es direccional, no será posible que un equipo ajeno intercepte la comunicación, a menos que se sitúe en la misma dirección en la que apunta la antena. Además, sería posible una localización precisa de usuarios que estuvieran realizando un uso fraudulento de los servicios ofertados por la red.

Introducción de nuevos servicios. Puesto que la red podría tener acceso a información acerca de la posición de los móviles, es posible pensar en servicios tales como radiolocalización en llamadas de emergencia, tarificación geográfica, publicidad de servicios cercanos, información en lugares turísticos, gestión avanzada de flotas. No obstante, la implantación de estas antenas en la red móvil no está exenta de inconvenientes.

En comparación con los sistemas radiantes convencionales, los sistemas de antenas inteligentes son mucho más complejos y difíciles de diseñar. Será necesaria una cadena de transmisión/recepción independiente para cada elemento del *array*, y todas ellas deberán estar balanceadas y calibradas en tiempo real. Además, es imprescindible el uso de potentes procesadores (DSPs, por ejemplo) para ejecutar los algoritmos de optimización, conformación de haz, detección del ángulo de llegada, etc. En definitiva, se llega a la conclusión de que no será posible diseñar independientemente el sistema radiante y la propia estación base.

El hecho de que exista un haz de radiación enfocado hacia cada usuario implica que las funciones de red deben revisarse en particular, las que afectan a la gestión de recursos radio (RRC) y a la gestión de movilidad (MM). Por ejemplo, algunos procedimientos que pueden verse afectados son los de selección y reelección de celda, establecimiento de conexiones, *handover*, *paging*. La introducción de un sistema de antena inteligente implica tener muy

en cuenta sus características a la hora de realizar, la planificación de la red celular. En particular, habrá que contar con el aumento de alcance, la eliminación de fuentes de interferencia, el seguimiento angular de los usuarios, etc.

4.2 IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE ANTENA INTELIGENTE

Como se ha mencionado, la característica básica que se busca en el diseño de un sistema de antena inteligente es la capacidad de seleccionar espacialmente a los distintos usuarios. Existen varias formas de implementar un sistema con esta capacidad, las cuales se describen a complejidad por orden de complejidad.

4.2.1 HAZ CONMUTADO

Es la técnica más simple El sistema radiante genera varios haces fijos, cada uno de ellos apuntando en una dirección distinta, de modo que entre todos se cubre toda la zona deseada (Un sector o una celda). La inteligencia del sistema se encarga de seleccionar el haz que mejor servicio da a cada usuario en particular, en función de algún parámetro de control (Mayor nivel de potencia recibida, mejor SNR y mejor C/I).

Esta técnica no garantiza que el móvil se encuentre en la dirección de máxima radiación de haz que le da servicio, ni que las señales interferentes se vean notablemente reducidas (Ya que siempre es posible alguna entre por uno de los lóbulos secundarios). De hecho, sería posible recibir una señal deseada, empeorando apreciablemente las presentaciones del sistema.

Una versión más avanzada de esta técnica consistiría en seleccionar con un haz la señal deseada y con otros algunas de sus componentes multitrayecto, de forma que puedan procesarse todas con un receptor.

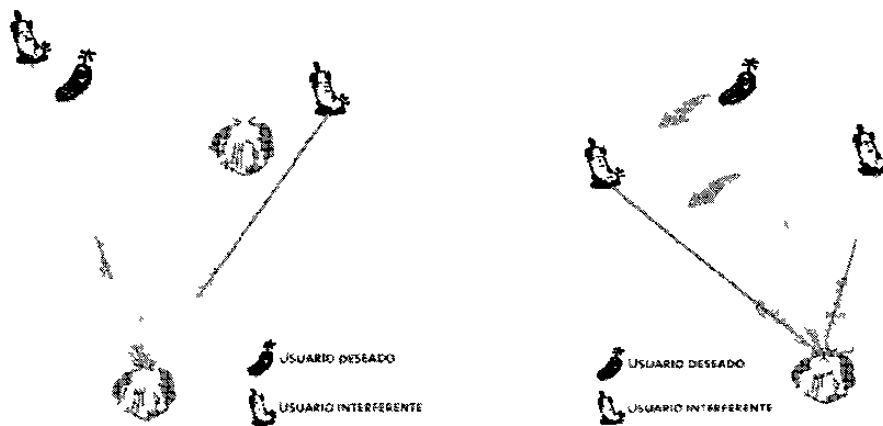


Figura 4.2 a) Antena de haz conmutado b) Antena de haz de seguimiento

4.2.2 HAZ DE SEGUIMIENTO.

Esta técnica es más compleja que la anterior. Requiere el uso de un *array* en el que se pueden controlar electrónicamente las fases con las que se alimentan los distintos elementos, de modo que puede modificarse a voluntad la dirección en la que apunta el lóbulo principal de la antena. A su vez, es necesario utilizar algún algoritmo de detección de la dirección de llegada (DoA), de modo que pueda reorientarse dinámicamente el haz para apuntar al usuario deseado. Con esta técnica sí se puede garantizar que el usuario se encuentra iluminado en todo momento por el lóbulo principal y con máxima ganancia (dentro de las limitaciones de los algoritmos que se empleen). Sin embargo, tampoco puede evitarse que las interferencias entren por algún lóbulo secundario del diagrama de radiación. Para aprovechar las señales multitrayecto sería necesario detectar y seguir con otros haces dichas componentes y luego procesarlas con un receptor Rake

4.2.3 HAZ ADAPTATIVO

Este sería el máximo nivel de inteligencia con que se podría dotar al sistema. En este caso, la salida de cada elemento del *array* se pondera con un factor de peso cuyo valor se asigna dinámicamente, de modo que se conforma el diagrama de radiación para maximizar algún parámetro de la señal (por ejemplo, la SINR). De este modo, el diagrama sintetizado habitualmente presentará un lóbulo principal en la dirección del usuario deseado, lóbulos secundarios en las direcciones de las componentes multitrayecto (Si se quieren procesar con un receptor Rake) y mínimos (é incluso nulos) de radiación en las direcciones de las fuentes de interferencia.

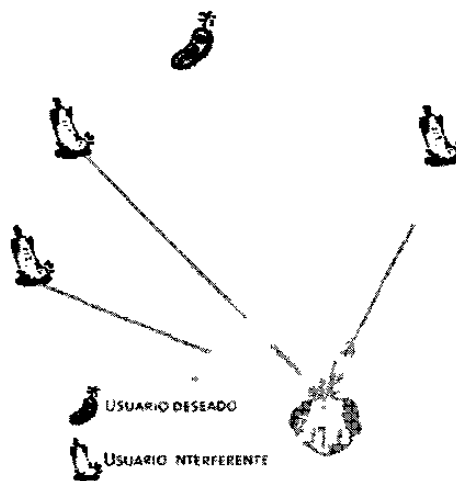


Figura 4.3 Antena de haz adaptativo

No siempre será posible eliminar toda la interferencia, ya que el número de fuentes interferentes que se pueden suprimir está directamente relacionado con el número de elementos de la antena.

Esta técnica requiere el uso de complicados algoritmos, tanto para la detección de las señales deseada e interferente como para la optimización de los pesos que conforman el haz. Estos algoritmos suelen conllevar una gran carga computacional, mientras que deben procesarse en tiempo real, por lo que

suponen una seria limitación. Por ser el caso más interesante, algunos de los algoritmos utilizados se comentan más adelante.

Una vez conocidos los tipos de antenas inteligentes, es necesario estudiar los modos de introducción de esta tecnología en una red de comunicaciones móviles.

Existen tres modos de aplicarla, en función del grado de aprovechamiento de la selectividad espacial que ofrece:

4.2.4 RECEPTOR DE ALTA SENSIBILIDAD

Receptor de alta sensibilidad (HSR), esta configuración consiste en utilizar antenas inteligentes sólo en el enlace ascendente. De este modo, gracias a la mayor directividad de la antena, se consigue mejorar la sensibilidad global de la cadena de recepción de la estación base. Esto supone varias ventajas:

En primer lugar, al mejorar la sensibilidad en el enlace ascendente, aumentará la extensión de la zona de cobertura. Esta mejora podría llegar a ser tan grande como para que fuera el enlace descendente el más restrictivo a la hora de calcular la cobertura de una estación base.

En segundo lugar, la mayor ganancia de la antena significa también que los móviles más cercanos podrían emitir con menor potencia manteniendo la calidad del enlace, con el consiguiente ahorro de baterías.

Por último, se lograría una mejora de la relación C/I , lo que implicaría menores tasas de error y una mejor calidad. No podría emplearse la mejora en la C/I para incrementar la capacidad de un sistema CDMA, ya que dicha mejora sólo está presente en el enlace de subida y no en el de bajada.

4.2.5 RECHAZO DE INTERFERENCIAS POR FILTRADO ESPACIAL

Rechazo de interferencias por filtrado espacial (SFIR). En esta configuración se emplean antenas inteligentes tanto en el enlace ascendente como en el descendente, con lo cual se consigue aprovechar la mejora por selectividad espacial en ambas direcciones. En este caso, la mejora que se experimenta en la C/I, además de reducir la BER del sistema, puede explotarse directamente para aumentar la capacidad del sistema CDMA como es UMTS. Esto también podrá lograrse indirectamente en GSM, si se hace un plan de frecuencias más ajustado: al ser menor la distancia de reutilización, puede aumentar el número de portadoras por estación base .

4.2.6 ACCESO MULTIPLE POR DIVISION ESPACIAL

Acceso múltiple por división espacial (SDMA). Esta sería la configuración más compleja, pues consiste en aprovechar al máximo las propiedades de selectividad espacial de las antenas de ambos enlaces para ubicar simultáneamente a varios usuarios en el mismo canal. Es decir, que podría haber varios usuarios utilizando al mismo tiempo la misma frecuencia y el mismo código de *scrambling* (ó el mismo timeslot en GSM), estando discriminados únicamente por su posición angular respecto de la estación base. En este caso, el aumento en la capacidad se produce en forma directa, debido a que se ha añadido una nueva dimensión para la gestión del espectro.

La introducción de SDMA supondría la necesidad de contar también con complicados sistemas de gestión de usuarios, de asignación de canales, etc.

La aplicación de SDMA a UMTS es bastante dudosa: al ser un sistema CDMA existen gran cantidad de usuarios compartiendo simultáneamente la misma frecuencia y que se distinguen sólo por su código de *Scrambling*. Por tanto, sería muy complejo implementar un sistema capaz de diferenciar a cada usuario por situación espacial, además de poco necesario, ya que los códigos

de *scrambling* producen una separación suficiente y existen códigos de sobra para todos los usuarios.

4.3 ALGORITMOS DE CONFORMACIÓN DE HAZ

A continuación se describen brevemente los algoritmos que deben implementarse a la hora de diseñar un sistema de antenas inteligentes basado en haces adaptativos, que son los más complejos y, a la vez, los más interesantes.

En primer, supongamos que existen K usuarios, cada uno de los cuales transmiten una señal $s_k(t)$. La señal del usuario k -ésimo sufre varias reflexiones y llega a la estación base a través de L_k trayectos distintos, cada uno de los cuales tiene un amplitud y una fase diferentes ($a_{ki} \cdot e^{j\phi_{ki}}$), y llega con un retardo (τ_{ki}) y una dirección diferentes. En la estación base tenemos un *array* de N antenas, que, para simplificar, supondremos que están alineadas y equiespaciadas. En estas condiciones, la señal recibida en el elemento n -ésimo del *array* es:

$$U_n(t) = \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} a_{ki}(\phi_{ki}) \cdot \alpha_{ki} \cdot s_k(t - \tau_{ki}) + n_n(t) \quad (1)$$

Donde:

$A_n(\phi_{ki}) = \exp(jknd \cdot \cos(\phi_{ki}))$ es la fase con la que llega la señal al elemento n -ésimo.

$K = 2\pi/\lambda$ es el número de onda para la frecuencia de trabajo cuya longitud de onda es λ .

Para sintetizar un diagrama de radiación con una cierta distribución de lóbulos, es necesario multiplicar la salida de cada uno de los elementos por un peso complejo $\mathbf{W}_n(t)$ y luego sumarlas todas. Utilizando una notación vectorial, la señal a la salida del *array* será:

$$y(t) = \overset{r}{\mathbf{w}}(t)^H \cdot \overset{r}{u}(t) = \overset{r}{\mathbf{w}}(t)^H \cdot \left(\sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^{L_k} \overset{r}{a}_i \cdot \alpha_{ki} \cdot s_k(t - \tau_{ki}) + \overset{r}{n}(t) \right) \quad (2)$$

Donde los vectores $\overset{\perp}{\mathbf{w}}, \overset{\perp}{\mathbf{a}}$ y $\overset{\perp}{\mathbf{n}}$ son vectores columna, con los elementos $\mathbf{w}_n, \mathbf{a}_n$ y \mathbf{n}_n correspondientes ($1 \leq n \leq N$), y el operador \mathbf{H} significa “hermítico” (transpuesto y conjugado).

El problema consiste entonces en encontrar un vector de pesos $\overset{\perp}{\mathbf{w}}$ capaz de sintetizar un diagrama de radiación que nos sea útil para apuntar a un usuario. Si nuestro sistema dispone de \mathbf{N}_R cadenas receptoras (es decir, es capaz de establecer hasta \mathbf{N}_R comunicaciones simultáneas con otros tantos usuarios), habrá que calcular a la vez \mathbf{N}_R vectores de pesos, aplicarlos a las salidas de los elementos del *array* y obtener así las \mathbf{N}_R salidas (una para cada receptor). El cálculo del vector $\overset{\perp}{\mathbf{w}}$ que se mejor se adapte a nuestras necesidades (según queramos maximizar la SNR, aprovechar la diversidad de trayectos, etc.) puede realizarse mediante algoritmos muy diversos.

Existen, básicamente, tres tipos de algoritmos para el cálculo del vector de pesos, cuales se diferencian en el modo en que seleccionan al usuario deseado

4.3.1 TÉCNICAS CON REFERENCIA TEMPORAL.

En este caso, el receptor genera localmente una estimación de la señal del usuario que desea captar (obtenida usualmente a partir de una secuencia de entrenamiento o de un código de *scrambling*). Entonces, el algoritmo encontrará

el valor de w que minimiza el error ante la señal de salida del *array* , $\mathbf{y}(t)$, y la estimación, $\mathbf{d}(t)$. La solución óptima es:

$$\mathbf{w}_{opt}^r = R^{-1} \cdot \mathbf{p}^v \quad (3)$$

Donde $R = E \begin{bmatrix} r & r^H \\ u & u \end{bmatrix}$ es la matriz de autocorrelación de la señal de entrada y

$\mathbf{p}^r = E \begin{bmatrix} r \\ u \cdot d(t)^* \end{bmatrix}$ es la correlación cruzada entre la señal a la entrada y la señal deseada.

No siempre es sencillo o viable obtener estas matrices de correlación, por lo que existen varias técnicas que tratan de aproximar este valor óptimo. Dos soluciones clásicas son la MMSE y la LS. La diferencia entre ambas es que la MMSE encuentra el \mathbf{w} óptimo entre todo el conjunto de posibles realizaciones (para lo cual hay que suponer un entorno estacionario), mientras que la LS lo encuentra en un número finito de muestras (*snapshots*), por lo que no necesita suponer estacionariedad. La solución encontrada con estas técnicas maximiza la SNR media (puede ser la media de conjunto en MMSE o una media temporal en LS). Con esto se consigue dirigir el haz hacia el usuario deseado, reduciéndose el nivel de ruido a la entrada. Además, impone nulos de radiación en las señales interferentes y de multitrayecto correlacionado se recibe por haces secundarios y puede explotarse con un receptor Rake convencional.

4.3.2 TÉCNICAS CON REFERENCIA ESPACIAL.

Estas técnicas no requieren el uso de secuencias de entrenamiento, pero, en cambio, necesitan estimar la DoA del usuario deseado y de los interferentes (lo que supone el uso de otros complejos algoritmos para hacer dicha estimación). La ventaja de éstas frente a las anteriores es que no necesitan conocer los

estadísticos de la señal y convergen más de prisa, al no tener que invertir grandes matrices. En cambio, son muy sensibles a los posibles errores de apuntamiento (debidos a una mala calibración de los elementos del *array* o a desviaciones en los algoritmos de cálculo de DoA), ya que si la dirección en la que se dirige el haz no coincide con la de la señal que se busca, ésta puede ser eliminada como una interferencia más. Como ejemplo, cabe citar las técnicas MaxSNR (que maximiza la SNR a la salida del *array*, si se conocen ciertos estadísticos del ruido) y LCMV (que minimiza la varianza de la señal de salida, sujeta a algunas restricciones).

4.3.3 TÉCNICAS CON REFERENCIA CIEGA

En este tipo de técnicas, más complejas, lo que se explota es alguna característica conocida de la señal deseada, como alguna modulación, algún tipo de cíclicidad, etc. Por ejemplo, podemos citar la técnica CMA, en la que se fuerza una solución de envolvente constante (interesante cuando la señal deseada verifique esta característica, como es el caso de UMTS, que utiliza modulación QPSK).

Habitualmente, el algoritmo que se diseña para una aplicación no se encuadra exactamente en uno de estos tipos, sino que puede utilizar algún esquema híbrido para mejorar sus prestaciones. Algunos algoritmos interesantes en este sentido pueden ser:

4.3.4 PROCESADO HAZ-ESPACIO

Consta de dos etapas, la primera genera una serie de salidas asociadas a distintos haces fijos, las cuales, en la segunda etapa, se procesan según algún criterio establecido.

4.3.5 CONFORMADOR DE BANDA ANCHA

Emplea una serie de líneas de retardo y de filtros FIR con los que sintetiza la respuesta en frecuencia de cada haz.

4.3.6 CONFORMADOR EN EL DOMINIO DE LA FRECUENCIA

Realiza una FFT a la salida de cada antena, de modo que se calcula el vector de pesos óptimo para cada componente espectral. Después se realiza una IFFT para recuperar la señal de banda ancha.

4.3.7 CONFORMADOR DIGITAL

Se toman muestras a la salida de cada elemento de *array*, que luego se procesan (mediante pesos y retardos) para generar los haces deseados. Si se desea conseguir precisión en el apuntamiento del haz, es necesario muestrear mucho más allá del criterio de Nyquist.

4.3.8 MÉTODO DE LA AUTOESTRUCTURA.

Separa los subespacios de señal deseada y ruido utilizando los autovectores de la matriz de autocorrelación de las señal recibida.

A la hora de utilizar alguno de estos algoritmos, ha de tenerse en cuenta que no es muy eficiente calcular la solución completa cada vez que se desee actualizar el valor de w (Normalmente cada trama 10 ms en UMTS). En lugar de eso, es más razonable limitarse a calcular únicamente la diferencia entre el valor que tenía en el instante anterior y el valor que se supone que debería tener en el actual (Algoritmos adaptativos). Un algoritmo así permitiría, además, capturar a nuevos usuarios y seguir a aquellos que se desplazan.

Entre los más interesantes destacan el método del gradiente conjugado, la regla tercera de Madaline (basado en redes neuronales), el LS-CMA (una extensión no lineal del LS que aprovecha las características del algoritmo (CMA).

Existen algunos algoritmos diseñados explícitamente para sistemas CDMA. Estos algoritmos deben ser adaptativos y multiusuario; es decir, deben extraer la señal de todos los usuarios simultáneamente (por lo tanto, calcularán uno distinto para cada usuario). Unos son con referencia ciega, pero los más sofisticados utilizan como referencia temporal los propios códigos de *scrambling* de cada usuario, para distinguirlos.

La aplicación de un algoritmo u otro en el diseño de una antena inteligente depende del compromiso al que se desee llegar entre la funcionalidad del método (robustez, flexibilidad, etc.) y su eficiencia computacional (sobre todo teniendo en cuenta que se desea conseguir que funcione en un tiempo real). Esto es cierto cuando hablamos del enlace ascendente, sin embargo, en el caso del enlace descendente, existen, además, ciertas consideraciones que hay que tener en cuenta.

En efecto, en el enlace descendente es la estación base la que transmite y, por tanto, debe conocer de algún modo la dirección en la que se encuentran los usuarios para poder iluminarlos con los haces. Puesto que en el enlace ascendente ya se han calculado los pesos que apuntan los haces hacia los usuarios, podría parecer razonable utilizar esos mismos pesos para conformar el diagrama de radiación en el enlace de bajada. Sin embargo, en general esto no será así, dado que las bandas de frecuencias para *uplink* y *downlink* están lo bastante separadas como para que la respuesta del canal sea distinta en cada caso, y por tanto, cambie la distribución espacial, temporal y espectro de los multitrayectos y de las interferencias.

En estos casos es más razonable utilizar algún algoritmo para calcular la DoA del usuario deseado y de los interferentes en el enlace ascendente, de modo que luego pueda sintetizarse un diagrama de radiación atendiendo a las posiciones calculadas de los usuarios. Esta síntesis puede hacerse entonces utilizando las técnicas clásicas de síntesis de diagrama de radiación.

4.4 CANALES INVOLUCRADOS

De toda la estructura de canales de transporte definida en UMTS, no todos ellos admiten ser transmitidos o recibidos a través de una antena de haz conformada, sino que obligatoriamente deben hacer uso de una antena omnidireccional o sectorial (es el caso de los canales de difusión, *paging*, acceso aleatorio, etc.). De hecho, los únicos canales que admiten conformación de haz son el canal dedicado (DCH) y el canal de acceso dirigido (FACH):

4.4.1 EL CANAL DEDICADO

El DCH es el canal bidireccional que lleva los datos y la señalización asociada a un usuario cuando éste se encuentra en modo circuitos (a veces también en modo paquetes).

4.4.2 EL CANAL DE ACCESO DIRIGIDO

El FACH es un canal downlink que lleva los avisos (pages) para los terminales móviles cuya situación es conocida por la red.

Nos centraremos principalmente en el DCH, que es el que tiene una componente *uplink*, ya que hemos visto que en el caso del enlace descendente se consigue apuntar al usuario deseado haciendo uso de algoritmos de detección de la DoA y de una síntesis clásica del haz.

El DCH se soporta sobre un canal físico de control (DPCCH) y de uno a seis canales físicos de datos (DPDCH), los cuales van multiplexados en las

ramas I y Q de la modulación. Con la solución propuesta, puede obtenerse una referencia espacial para el algoritmo adaptativo a partir del código de *scrambling* recuperado del primer bit del *slot* 0 del DPCCH: El algoritmo se actualizaría recogiendo ese primer bit cada vez que comience una trama (es decir, cada 10ms). En la solución, la referencia espacial se obtiene a partir del código de canalización del DPCCH (que puede obtenerse igualmente del primer bit del *slot* 0 de cada trama DPCCH), pero como el código de canalización es distinto para el DPCCH y para el DPDCH, puede aparecer una degradación apreciable en el funcionamiento del algoritmo adaptativo, ya que éste trataría al DPDCH como una señal interferencia a eliminar.

Otra posible solución sería aprovechar la secuencia piloto transmitida en los primeros bits de cada *slot* DPCCH, la cual, se multiplica por los códigos de canalización y de *scrambling*, puede servir como señal de referencia para el algoritmo adaptativo. La actualización es más razonable hacerla trama a trama que slot a slot, para aliviar la carga computacional de los procesadores.

4.5 PROCESAMIENTOS INVOLUCRADOS

Algunos de los procedimientos de las capas inferiores de UMTS pueden verse modificados en parte, debido a la utilización de estaciones base con antenas inteligentes . El organismo 3GPP tiene en fase de borrador una especificación técnica en la que se describirán con detalle estos cambios en los procedimiento de capa física, así como cambios en los protocolos radio, en las interfaces Iur e Iub, en los requisitos, en las medidas, etc.

Mientras se publica una primera versión de esta especificación, podemos mencionar cómo afectan las antenas inteligentes a alguno de los procedimientos siguientes:

4.5.1 SINCRONIZACIÓN Y BÚSQUEDA DE CELDA.

En principio, no deberían verse especialmente modificados, ya que se realizan a través de los canales de difusión, acceso aleatorio, etc., que son los que se seguirán transmitiendo a través de antenas convencionales. Lo mismo podría decirse del procedimiento de reelección de celda, ya que también se realiza cuando el móvil se encuentra en modo de espera.

4.5.2 CONTROL DE POTENCIA

El uso de antenas directivas debería mejorar las prestaciones del control de potencia, ya que se debería conseguir una reducción de la potencia transmitida por ambas partes. No obstante, el algoritmo en sí no tendría que verse afectado en exceso, ya que se basa en medidas que se hacen sobre la potencia recibida.

4.5.3 ESTABLECIMIENTO DE LLAMADAS

Este procedimiento comenzaría como es habitual, cuando el móvil hace uso del canal de acceso aleatorio para solicitar el establecimiento de una comunicación. En este momento, el Nodo B podría utilizar estas señales que recibe para estimar la DoA de este usuario, de modo que, a continuación, puede generar un diagrama de radiación apuntado hacia él. Este diagrama, debidamente modificado en cada trama, será utilizado por el canal dedicado durante la llamada.

4.5.4 DIVERSIDAD

Habría que estudiaren detalle la compatibilidad de los distintos procedimientos de diversidad con un sistema de antena inteligente. Probablemente, el procedimiento de diversidad de transmisión y el empleo de diversidad de recepción serán menos decisivos; sin embargo, en la práctica se demuestra que

la utilización conjunta de diversidad de polarización y antenas inteligentes es más beneficiosa que el uso aislado de éstas.

4.5.5 LOCALIZACION

La localización de terminales podría mejorarse si se emplea la información de la dirección de apuntamiento de las antenas. Ésta información no está siempre disponible (si no se hace cálculo de la DoA, habría que acudir directamente a los pesos aplicados a las salidas del *array* para obtener la dirección de apuntamiento). Además, esta información podría dar lugar a conclusiones incorrectas en el caso de que no exista visión directa entre el móvil y la base, ya que, en este caso, la comunicación puede darse mediante rayos reflejados y la antena apunta a las direcciones en las que llegan estos rayos.

4.5.6 LLAMADAS

Como se ha mencionado, durante una llamada de voz se está ocupando un canal dedicado bidireccional, el cual puede ser transmitido y recibido mediante una antena inteligente. Es aquí donde los algoritmos de conformación de haz y de detección de las DoAs deben ejecutarse con total precisión para que la llamada prospere.

4.5.7 REELEVACION

Probablemente éste sea el procedimiento más afectado por el uso de antenas inteligentes. En efecto, supongamos que un móvil está siendo enfocado por el haz directivo de una estación base (Es decir, está en mitad de una llamada) y, en un momento dado, necesita cambiar de celda. Si la nueva estación base también está dotada de una antena inteligente, en primer lugar, y a partir de los mensajes que se intercambie con el móvil, tendrá que evaluar su DoA. Una vez conocida ésta ya podrá generar el diagrama de radiación adecuado para apuntar al móvil.

En el caso de que se implemente *soft handover* en la red, el procedimiento sería más sencillo: durante la llamada, el móvil se encuentra enfocado por las antenas de dos o más estaciones base simultáneamente, de modo que el cambio de una celda a otra es inmediato.

Por último, cabe comentar que los procedimientos pueden verse afectados de distinta forma en el modo FDD y en el modo TDD, como se desprende de Incluso se hace una distinción entre el modo TDD normal y el modo de baja tasa de chip (que ya se mencionó antes).

4.5.8 SISTEMAS DE RECEPCIÓN

El Servicio Centralizado de Información del Territorio cuenta con un equipo de recepción de imágenes del satélite NOAA. El equipo cuenta con una antena de 1.2 metros montada sobre un sistema motorizado de elevación. Además cuenta con un equipo GPS y una *Workstation* la cual soporta el sistema electrónico de radio y proporciona el soporte al *software* de adquisición, calibración, procesamiento e interpretación de las imágenes

Las estaciones SMART proporcionan gran efectividad para las aplicaciones generales y pueden ser fácilmente configuradas para aplicaciones específicas. Con la habilidad para conseguir información procedente de los satélites NOAA y SeaWIFS se pueden hacer pronósticos del tiempo, determinación de la cubierta vegetal, examinar ecosistemas regionales, etc.

El sistema SMART proporciona la situación del satélite, así como la zona de recepción, el azimut y la elevación de paso del satélite. Además se tiene el control para capturar información de los satélites cuando se desee y de la área especificada.

5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

El objetivo del desarrollo de las antenas inteligente es evaluar la diversidad que combina el funcionamiento para las antenas con el espaciamiento, el patrón radiante y la polarización variados. El segundo objetivo era medir el rechazo por interferencia alcanzado usando "beamforming" adaptativo y sistemas inalámbricos de manos libres.

Las radios de manos libres funcionan en ambientes de campo de área abierta en los cuales los efectos e interferencia multidireccionales limitan su funcionamiento. La diversidad que combina el sistema de conformación digital de haz DBF, compensa estas limitaciones. Las señales directas y reflejadas pueden cancelarse en algunas localizaciones, causando desvanecimiento mientras se mueve un transmisor o un receptor. Los sistemas banda ancha también experimentan interferencia intersimbólica debido a las señales multidireccionales. Estos efectos son los más severos cuando no hay trayectoria de la línea de vista del transmisor al receptor. Otro de estos efectos son la interferencia de usuarios que comparten el mismo canal, sistemas comerciales y la interferencia de canales hostiles también deteriora la operación de sistema.

El combinar la diversidad de señales a partir de dos o más antenas atenúa la señal debido a la propagación multidireccional. Los sistemas de antena que usan conformación digital de haz adaptativos bajan el desvanecimiento y también cancelan la interferencia de los transmisores que tienen características espaciales y diferentes de las del transmisor deseado.

5.2 RECOMENDACIONES

Dentro de las recomendaciones está el establecimiento de la planeación en la ubicación de las radiobases y en general de la infraestructura de telecomunicaciones, debido a que se observa una gran cantidad de torres distribuidas a nuestra consideración sin una regulación adecuada, tal es el caso de algunas compañías que han tenido que truncar sus torres debido al impacto ecológico y arquitectónico que provocan, también se observa la invasión a nuestros cerros con un gran número de torres, el avance tecnológico no debe implicar el deterioro ambiental. La creación de espacios designados para la instalación de esta infraestructura creemos que debe estar regulada por la participación de instancias gubernamentales y las empresas de telecomunicaciones.

BIBLIOGRAFÍA

R. L. Freeman
Telecommunication Transmission Handbook
Wiley Interscience
1998

P. Irazzaval
Análisis de Señales
Mc. Graw Hill
1999

J. D. Kraus
Antennas
Mc. Graw Hill
1980

D.M. Pozar
Microwave Engineering
Addison Wesley
1990

T. S. Rappaport
Smart Antennas For Wireless Communications
Prentice Hall
1999

T. S. Rappaport
Wireless Communications
Prentice Hall
2002

Timothy Pratt
Satellite Communications
Wiley
2004

Simon Haykin
Communication Systems
Wiley
2001

INDICE DE FIGURAS

| Figura | Capitulo 2 | Página |
|---------------------|---|--------|
| 2.1 | Forma ortogonal de la onda electromagnética. | 11 |
| 2.2a, 2.2b | Impedancia de transferencia Z_{ab} , Z_{ba} | 12 |
| 2.3 | Transición de la línea de transmisión al dipolo de media onda. | 14 |
| 2.4a, 2.4b | Dipolo plegado de media onda y tres elementos. | 15 |
| 2.5a, 2.5b | Diagrama de distribución espacial en coordenadas esféricas, diagrama de potencia de antena. | 18 |
| 2.6a, 2.6b, 2.6c | Patrón de radiación en coordenadas esférica, rectangular y polar. | 19 |
| 2.7a, 2.7b, 2.7c | Patrón de radiación para un dipolo de media onda. | 20 |
| 2.8 | Distribución decibélica de potencia. | 21 |
| 2.9 | Patrón de radiación tridimensional. | 22 |
| 2.10 | Diagrama de polarización de onda lineal, elíptica y circular. | 24 |
| Capitulo 3 | | |
| 3.1 | Esquema de técnicas de acceso múltiple: FDMA, TDMA y CDMA. | 28 |
| 3.2 | Secuencia de la difusión de espectro en transmisor y receptor. | 31 |
| 3.3 | Modelo básico de un sistema inalámbrico de comunicación. | 33 |
| 3.4 | Gráfica de la pérdida por propagación contra la distancia en una microcélula. | 35 |
| 3.6 | Gráfica del retraso de potencia con respecto a un receptor en desplazamiento. | 37 |
| Capitulo 4 | | |
| 4.1 | Prototipos de antena inteligente. | 40 |
| 4.2a, 4.2b | Antena de haz conmutado y de haz de seguimiento. | 44 |
| 4.3 | Antena de haz adaptativo. | 45 |

APENDICE

TEOREMA DE MUESTREO DE NYQUIST

El intervalo de la muestra en la frecuencia es fundamental en la relación entre la señal discreta y continua. La señal discreta siempre contendrá menos información que la señal continua, a menos que se den condiciones especiales, en cuyo caso se puede conservar la cantidad de información. El teorema de muestreo de Nyquist establece esas condiciones: si $f(x)$ es una función cuya transformada de Fourier $F(u)$ es cero para esa frecuencia, mayores que u_c , $F(u) = 0$ para $|u| > u_c$, entonces la señal muestreada es:

$$f_s(x) = \sum (x/T)f(x)$$

contiene la misma información que: $f(x)$ si $T < 1/2u_c$

En otras palabras el teorema de Nyquist establece que una función continua de ancho de banda limitado puede ser recuperada de sus muestras, siempre que estas hayan sido obtenidas con una frecuencia de muestreo superior a dos veces la máxima frecuencia contenida en la función original.

DISTRIBUCIÓN DE RAYLEIGH

En el canal de radio móvil la distribución de Rayleigh es comunmente usada la variación estadística natural de tiempo de desvanecimiento de la señal o de la envolvente de multitrayectoria. La envolvente es la componente gaussiana de ruido de dos señales en cuadratura que obedece la distribución de Rayleigh. La distribución de Rayleigh tiene una función de densidad de probabilidad dada por:

$$p(r) \begin{cases} & (0 \leq r \leq \infty) \\ \frac{r}{\sigma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma^2}\right) & \\ & (r < 0) \end{cases}$$

Donde σ es el valor de la raíz media cuadrada del voltaje de la señal de receptor antes de la detección y σ^2 es la potencia en el tiempo de la señal recibida. La probabilidad de que la envolvente no exceda un valor específico de R está dada por el valor r-medio de la distribución de Rayleigh:

$$r\text{-medio} = E[r] = \int_0^{\infty} r p(r) dr = \sigma \frac{\pi}{2} = 1.2533\sigma$$

GLOSARIO

| | |
|--------|---|
| BER | Relación Bit Error |
| CDMA | Acceso Múltiple por División de Código |
| CMA | Algoritmo Modular Constante |
| DBF | Conformación Digital de Haz |
| DCCH | Canal Dedicado de Control |
| DSP | Procesamiento Digital de Señales |
| EEM | Energía Electromagnética |
| FDD | División de Frecuencia Duplex |
| FDMA | Acceso Múltiple por División de Frecuencia |
| FEM | Fuerza Electromagnética |
| FSK | Modulación por Desplazamiento de Frecuencia |
| GMSK | Desplazamiento Mínimo Gaussiano |
| GPS | Sistema de Posicionamiento Global |
| GSM | Sistema Global de Comunicaciones Móviles |
| HEMT | Transistor de Alta Movilidad de Electrón |
| MESFET | Transistor de Efecto de Campo de Semiconductor Metálico |
| MMSE | Error Mínimo Cuadrado |
| MSK | Desplazamiento Mínimo |
| NRZ | No Retorno a Cero |
| OEM | Onda Electromagnética |
| PSK | Desplazamiento de Fase |
| QPSK | Desplazamiento de Fase en Cuadratura |
| SDMA | Acceso Múltiple por División de Espectro |
| TDD | División por Tiempo Duplex |
| TDMA | Acceso Múltiple Por División de Tiempo |
| UMTS | Sistema Universal Móvil de Telecomunicaciones |

AUTOBIOGRAFÍA

Nací en la Ciudad de Monterrey Nuevo León el cuatro de enero de 1961, hijo de César González Torres (+) y Alicia Margarita Cervantes Lozano de González (+). He realizado todos mis estudios en la ciudad de Monterrey. Mis primeros cuatro años de educación primaria los cursé en el Colegio Morelos que se ubicó durante muchos años en las calles de Matamoros y Zuazua de esta Ciudad, después ingresé a la escuela Primaria Dr. Jaime Torres Bodet en el sur de la ciudad donde concluí mi educación primaria.

Antes de estudiar la carrera de Ingeniería estudié hasta el tercer año de la carrera de Medicina. En 1985 ingresé a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León donde estudié la carrera de Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones de la cual soy egresado.

En el año de 1993 terminé mis estudios de Licenciatura, inmediatamente después inicié en la escuela de graduados la Maestría de Ingeniería Eléctrica con especialidad en Electrónica.

Laboralmente me he desempeñado en muy diversos ámbitos no siempre relacionados con mi profesión pero de los que he obtenido gran experiencia.

Actualmente imparto cátedra en la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica en el Departamento de Eléctrica y Electrónica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.

