

## Modulación Digital (Digital Modulation)

**Capítulo 11**

Ing. Marcial Antonio López Tafur  
mlopez@uni.edu.pe

2010-2

## Modulación Digital

- Introducción a la modulación digital
- Esquemas de Modulación Relevantes (Esquemas QPSK, GMSK, M-Ary)
- Recepción Coherente y Diferencial
- El impacto del canal móvil en la modulación digital
  - Ruido e interferencia
  - MF aleatorio (desvanecimiento banda angosta)
  - Interferencia íter-símbolo (desvanecimiento banda ancha)

UNI - Sistemas de MW 2

## Modulaciones en $\mu O$

- Tipos de Modulación
  - PSK (BPSK, QPSK, 8PSK)
  - QAM (16, 64, 128, 256, nQAM)
- Ejemplo: El SDH usa 128QAM lo que permite ajustar un bit rate de 155 Mbps en un ancho de banda de 28 MHz
- Demodulación: según el modulador, emplean ecualización adaptiva.

UNI - Sistemas de MW 3

El **bit rate** define la velocidad a la cual se transporta la información.

El **baud rate** (o *señalización*) define el numero de símbolos por segundo.

Cada símbolo representa  $n$  bits, y tiene  $M$  estados de señal, donde  $M = 2^n$ .

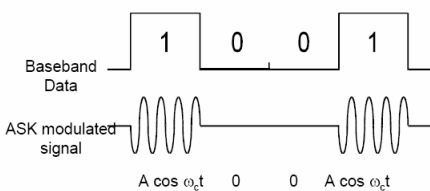
Conocido como *señalización M-ary*.

La máxima tasa de transferencia de información a través de un canal de banda base es:

- Capacidad  $f_b = 2 W \log_2 M$  bits por segundo
- donde  $W$  = ancho de banda de la señal modulante.

UNI - Sistemas de MW 4

## Amplitude Shift Keying (ASK)

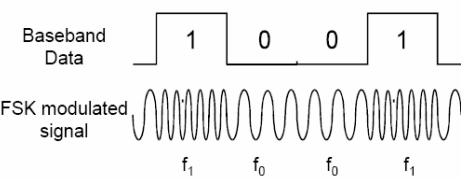


La formación del pulso puede ser empleado para remover el esparcimiento espectral.

ASK demuestra bajo rendimiento, como es afectada fuertemente por el ruido y la interferencia.

UNI - Sistemas de MW 5

## Frequency Shift Keying (FSK)

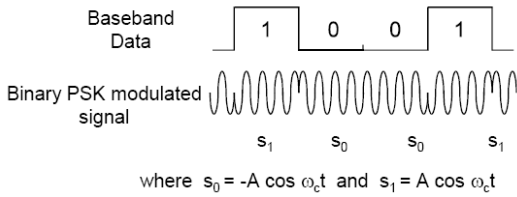


where  $f_0 = A \cos(\omega_c - \Delta\omega)t$  and  $f_1 = A \cos(\omega_c + \Delta\omega)t$

La ocupación del ancho de banda de la FSK es dependiente del espaciamento de los dos símbolos. Un espaciamento de frecuencia de 0.5 veces el período del símbolo es típicamente usado. FSK puede ser expandido a un esquema M-ary, empleando múltiples frecuencias como estados diferentes.

UNI - Sistemas de MW 6

### Phase Shift Keying (PSK)

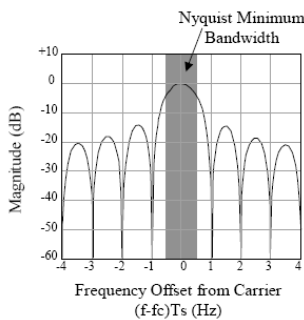


Binary Phase Shift Keying (BPSK) demuestra mejor rendimiento que el ASK y el FSK. PSK puede ser expandido a un esquema tipo M-ary, empleando múltiples fases y amplitudes así como diferentes estado. Se emplea filtrado para evitar el desparrame espectral.

### Teorema Shannon-Hartley para la capacidad

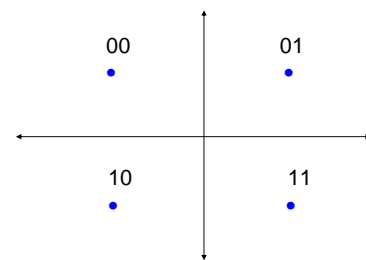
- Para una comunicación libre de errores, es posible definir la capacidad la cual pueda ser soportada en un canal con ruido blanco gaussiano aditivo (AWGN)  $f_b/W = \log_2(1 + E_b f_b / \eta W)$
- donde  $f_b$  = Capacidad (bits por segundo)
- $W$  = ancho de banda de la señal de banda base modulante (Hz)
- $E_b$  = energía por bit
- $\eta$  = densidad de potencia del ruido (watts/Hz)
- Luego  $E_b f_b$  = potencia total de la señal
- $\eta W$  = potencia total de ruido
- $f_b/W$  = eficiencia del ancho de banda (bits/segundo/Hz)

### Nyquist & Root-Raised Cosine Filters

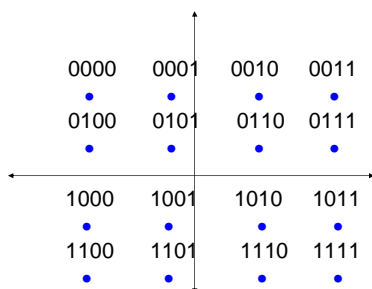


El ancho de banda de Nyquist es el mínimo ancho de banda que puede ser usado para representar una señal. Es importante limitar la ocupancia espectral de una señal, para mejorar la eficiencia del ancho de banda y remover la interferencia del canal adyacente. Los filtros tipo "Root raised cosine" permiten una aproximación a este ancho de banda mínimo.

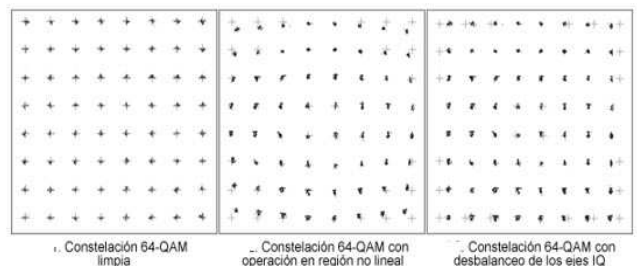
### Diagrama de Constelación QAM



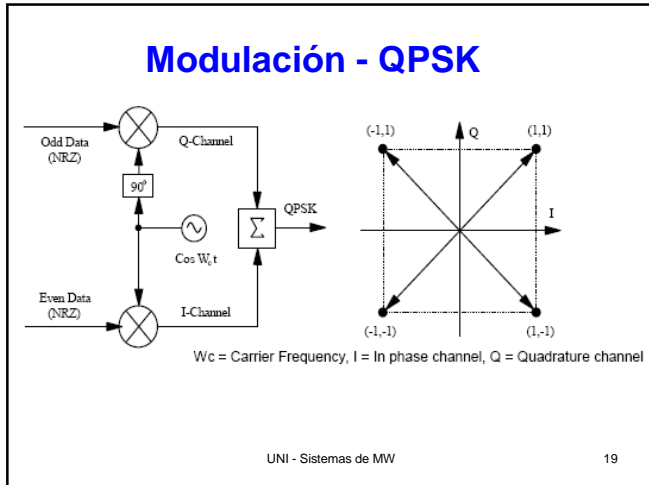
### Diagrama de constelación de 16QAM



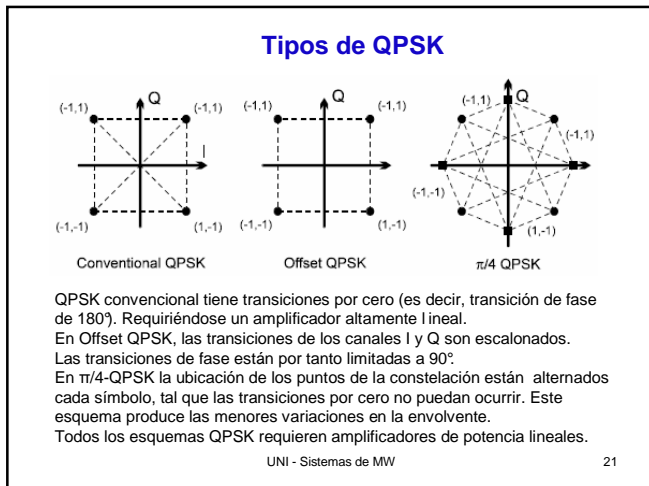
### Constelación 64QAM





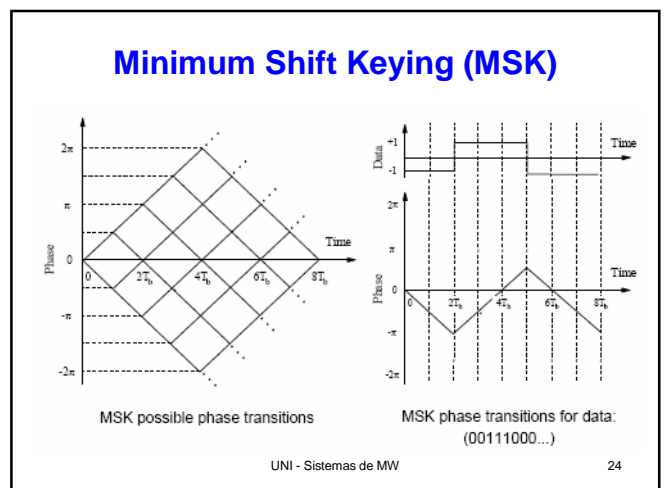


- Quadrature Phase Shift Keying son efectivamente dos sistemas independientes BPSK (I y Q), y por tanto exhiben el mismo rendimiento pero a *dobles* de la eficiencia del ancho de banda.
  - Quadrature Phase Shift Keying puede ser filtrado usando filtros tipo "raised cosine" para alcanzar una excelente supresión de productos fuera de banda..
  - Grandes variaciones en la envolvente ocurren durante las transiciones de las fases, es decir requieren de amplificación *lineal*.
- UNI - Sistemas de MW 20



- ### GMSK - Gaussian Minimum Shift Keying
- GMSK es una forma de FSK fase-continua, la cual la fase es cambiada entre símbolos para proveer una envolvente constante.
  - Consecuentemente, es una alternativa popular al QPSK.
  - El ancho de banda de RF es controlado ancho de banda del filtro Gaussiano pasa bajo.
- UNI - Sistemas de MW 22

- El grado de filtraje es expresado por la multiplicación del ancho de banda del filtro a 3dB por el periodo del bit de la tradición, es decir por BT.
  - A medida que el BT sea menor la cantidad de la *interferencia intersymbol* introducida se incrementa y este resultado en o penalidad en la potencia fija o en un error de piso irreducible.
  - GMSK permite usar amplificación no lineal eficiente clase C, no obstante aún con un bajo valor de BT la eficiencia de su ancho de banda menor que el QPSK filtrado.
- UNI - Sistemas de MW 23



- En MSK la fase se eleva a 90° para un “uno” binario, y cae 90° para un “cero” binario.
- Para la transmisión con GMSK, se usa un filtro de banda base de pre-modulación Gaussiano para suprimir los componentes de alta frecuencia en la data.
- El grado de supresión fuera de banda es controlado por el producto BT.

UNI - Sistemas de MW 25

### GMSK Signals

GMSK Pulse Shapes and ISI

En MSK, el BT es infinito y esto permite que un bit cuadrado directamente module el VCO. In GMSK, valores bajos de BT Crean interferencia Inter-símbolo (ISI) significativa. En el diagrama, la porción de la energía del símbolo actúa como un ISI para los símbolos adyacentes. Si el BT es menor que 0.3, se requiere alguna forma de combatir el ISI.

UNI - Sistemas de MW 26

### Espectro del GMSK

MSK tiene un lóbulo principal 1.5 veces que el del QPSK. GMSK generalmente alcanza una eficiencia de ancho de banda menor que 0.7 bits por segundo por Hz (QPSK puede ser tan alto como 1.6 bits por segundo por Hz).

UNI - Sistemas de MW 27

### Modulación de fase y amplitud Multi-nivel (M-ary)

- Amplitud y phase shift keying pueden ser combinadas para transmitir varios bits por símbolo (en este caso M=4). Estos esquemas de modulación son referidos como *lineales*, porque requieren amplificación lineal.
- 16QAM tiene la mayor distancia entre puntos, pero requiere amplificación muy lineal. 16PSK tiene requerimientos menos estrictos, pero tiene menos espacio entre puntos de la constelación y es por tanto más afectado por el ruido.
- Esquemas M-ary son más eficientes en ancho de banda, pero más susceptibles al ruido.

UNI - Sistemas de MW 28

16 QAM

16 PSK

16 APSK

UNI - Sistemas de MW 29

### Comparación de los esquemas de modulación.

- El gráfico muestra que la eficiencia del ancho de banda es un compromiso relativo a la eficiencia de potencia.
- MFSK es eficiente en potencia, pero no lo es en ancho de banda.
- MPSK y QAM son eficientes en ancho de banda pero no en potencia.
- Los sistemas satelitales son limitados en ancho de banda, por consiguiendo el PSK es mas adecuado

UNI - Sistemas de MW 30

## Comparación de los tipos de modulación

Modulation Format	Bandwidth efficiency (C/B)	$\log_2 (C/B)$	Error free Eb/No
16 PSK	4	2	18dB
16 QAM	4	2	15dB
8PSK	3	1.585	14.5dB
4PSK	2	1	10.1dB
4QAM	2	1	10.1dB
BFSK	1	0	13dB
BPSK	1	0	10.5dB

## Recepción Coherente

- Un estimado de of tta atenuación y fase del canal es recuperado. Luego es posible reproducir la señal transmitida, y demodularla. Si es necesario tener una versión exacta de la portadora, de otra manera se introducen errores.
- Los métodos para recuperar la portadora incluyen:
  - Tono piloto (Tal como el tono transparente en banda) Menos potencia en la señal de referencia de la información.
  - High peak-to-mean power ratio
  - Pilot Symbol Assisted Modulation
- Menos potencia en la señal de referencia de la información.
- Recuperación de la portadora: La portadora es recuperada de la información de la señal.

## Recepción diferencial

- En el transmisor, cada símbolo es modulado en relación al símbolo previo, por ejemplo en BPSK diferencial "0" = sin cambio y "1" = +180°
- En el receptor, el símbolo actual es demodulado usando el símbolo previo como referencia.
- La recepción diferencial es teóricamente 3dB más pobre que la coherente. Esto es porque el método diferencial tiene *dos* fuentes de error: un símbolo corrupto y una referencia corrupta (el símbolo previo).
- La recepción no-coherente es más fácil de implementar.

## Modulación - Sumario

El PSK provee un esquema de modulación para el ancho de banda altamente eficiente.

QPSK, es muy robusto, pero requiere alguna forma de amplificación lineal. OQPSK y p/4-QPSK pueden ser implementados, y reducen las variaciones de la envolvente de la señal.

Esquemas de alto nivel M-ary (tales como 64-QAM)

son muy eficientes en ancho de banda, pero más susceptibles al ruido y requieren amplificación lineal.

Esquemas de envolvente constante (tal como el GMSK) pueden ser empleados desde que un eficiente, amplificador no lineal puede ser usado.

La recepción coherente provee mejor rendimiento que el diferencial, pero requiere un receptor más complejo.

## Sistemas de transmisión remota para televisión usando tecnología COFDM

## COFDM

- Multi-Carrier modulation scheme
  - 200 a 8000 portadoras.
- Muy popular - DVB-T (Europeo)
- Estándar - 2048 portadoras
  - Fabricantes: Tandberg / Nucomm / MRC



## Lo básico del COFDM

- Cada portadora modulada usando QPSK, 16QAM o 64QAM
  - QPSK - Mas robusto
- Recomendado para los mejores resultados
- Amplificadores sólo 2dB down
  - 16QAM
  - Amplificadores 3dB down
  - 64QAM – Gran velocidad de datos
  - Menos resiliente al multitrayecto
  - Amplificadores de 4 a 5dB down

Modulation System	Code Rate	Guard Interval			
		1/32	1/16	1/8	1/4
IF = 9.142887 MHz		F <sub>lo</sub> = 80.857143 MHz		BW = 8 MHz	
C <sub>ik</sub> = 36.571429 Mbit/s		Data Rate (Mbit/s)			
QPSK	1/2	6.032086	5.854671	5.529412	4.976471
	2/3	8.042781	7.806228	7.372549	6.635294
	3/4	9.048128	8.782007	8.294118	7.464706
	5/6	10.053478	9.757785	9.215686	8.294118
16-QAM	1/2	12.064172	11.709342	11.058824	9.952942
	2/3	16.085562	15.612458	14.746098	13.270588
	3/4	18.096256	17.564014	16.588236	14.929412
	5/6	20.106952	19.51557	18.431372	16.588236
64-QAM	1/2	18.096256	17.564013	16.588236	14.929413
	2/3	24.128343	23.418684	22.117647	19.905882
	3/4	27.144384	26.348021	24.882354	22.394118
	5/6	30.160428	29.273355	27.647058	24.882354
	7/8	31.66845	30.737025	29.029413	26.126472

Modulation System	Code Rate	Guard Interval			
		1/32	1/16	1/8	1/4
IF = 6.85714275 MHz		F <sub>lo</sub> = 63.14285725 MHz		BW = 6 MHz	
C <sub>ik</sub> = 27.428571 Mbit/s		Data Rate (Mbit/s)			
QPSK	1/2	4.5240645	4.48248248	4.2334561	3.81011061
	2/3	6.03208575	5.854671	5.5294118	4.9764705
	3/4	6.786096	6.58850525	6.2205885	5.5985295
	5/6	7.540107	7.31833875	6.9117645	6.2205885
16-QAM	1/2	9.048129	8.7820085	8.294118	7.4647065
	2/3	12.0641715	11.709342	11.058824	9.952941
	3/4	13.572192	13.1730105	12.441177	11.197059
	5/6	15.080214	14.6366775	13.823529	12.441177
64-QAM	1/2	13.5721935	13.1730098	12.441177	11.1970598
	2/3	18.0962573	17.564013	16.588235	14.9294115
	3/4	20.356288	19.7595158	18.661766	16.7955885
	5/6	22.620321	21.9550183	20.735294	18.9617666
	7/8	23.7513375	23.0527688	21.77208	19.594854

Modulation System	Code Rate	Guard Interval			
		1/32	1/16	1/8	1/4
IF = 7.999999876 MHz		F <sub>lo</sub> = 82.000000125 MHz		BW = 7 MHz	
C <sub>ik</sub> = 32.0000 Mbit/s		Data Rate (Mbit/s)			
QPSK	1/2	5.27807525	5.12283713	4.8382355	4.35441213
	2/3	7.037483375	6.8304495	6.45098038	5.80598225
	3/4	7.917112	7.68425613	7.25735325	6.53161775
	5/6	8.7967915	8.53808188	8.08372525	7.25735325
16-QAM	1/2	10.5561505	10.2456743	9.676471	8.70882425
	2/3	14.07486675	13.680899	12.9019608	11.8117645
	3/4	15.834224	15.3685123	14.5147085	13.0832355
	5/6	17.593583	17.0761238	16.1274505	14.5147085
64-QAM	1/2	15.83422575	15.3685114	14.5147085	13.0832364
	2/3	21.11230013	20.4913485	19.3529411	17.4178468
	3/4	23.751336	23.0527684	21.7720598	19.5948533
	5/6	26.3903745	25.6141856	24.1911758	21.7720598
	7/8	27.70989375	26.8948959	25.4007984	22.860663

## Desventajas

- Todavía son relativamente costosos
  - COFDM Mod/MPEG-2/4 Codificador - \$20K
  - COFDM Demod/MPEG-2 Decodificador - \$2K
- Los amplificadores de salida de potencia de RF deben tener un **back off** de 2 a 5dB, dependiendo del tipo de modulación escogido.

## Consideraciones de diseño de los sistemas COFDM

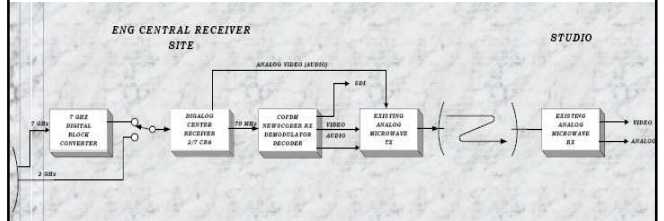
- Unidades móviles (ENG Vans)
  - Los transmisores deberán ser reemplazados si sus amplificadores existentes no son "digital ready"
- Osciladores de bajo ruido de fase.
- Heterodinos - upconverter de conversión dual
- Amplificadores deben estar polarizados para una operación lineal.
  - Adicione modulador COFDM y codificador MPEG-2/4
  - Adicione una segunda antena - Omni (opcional)

- En los lugares de recepción
  - Los sistemas de antenas en 7/10/13 GHz - deben actualizarse
- LNA/Block Down-Converter
  - Los receptores centrales deberán ser capaces de pasar la señal digital (sino deberán actualizarse o cambiarse según sea el caso).
- Osciladores de bajo ruido de fase
  - Adicionar demodulación COFDM y decodificación MPEG-2/4 (una sola unidad)

UNI - Sistemas de MW

43

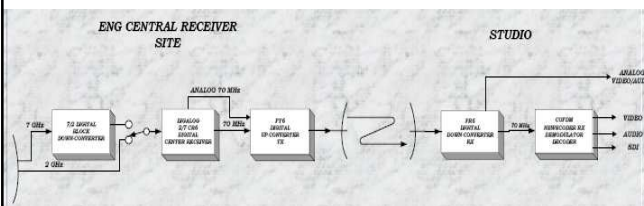
### Diagrama de bloques de un receptor COFDM usando un enlace de retorno analógico



UNI - Sistemas de MW

44

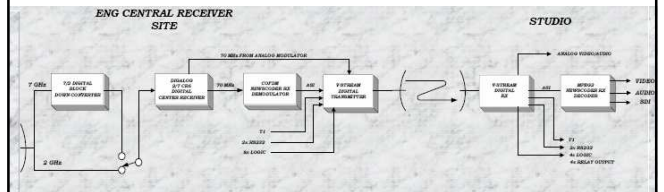
### Diagrama de bloques de un receptor COFDM con enlace repetidor de retorno en FI de 70 MHz



UNI - Sistemas de MW

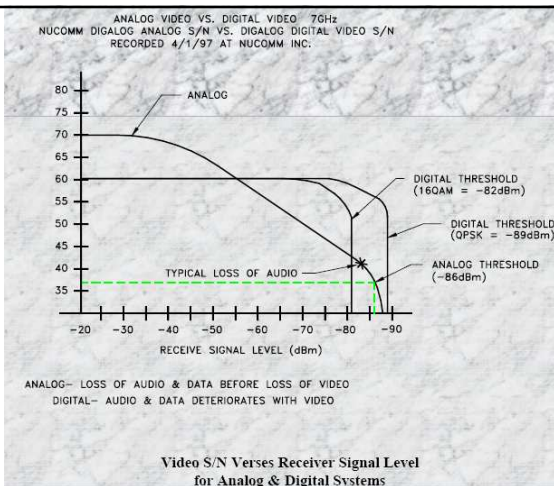
45

### Diagrama de bloques de un sistema de recepción COFDM



UNI - Sistemas de MW

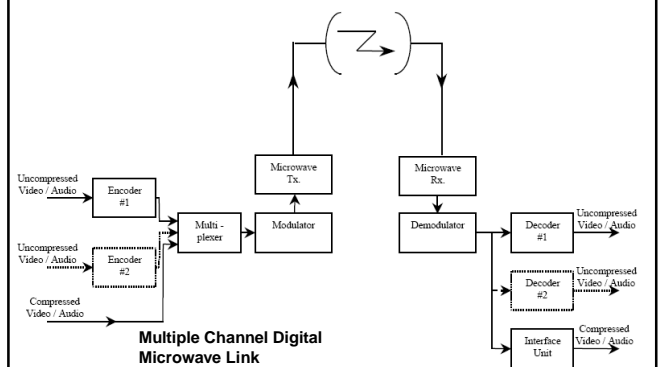
46



Video S/N Verses Receiver Signal Level for Analog & Digital Systems

47

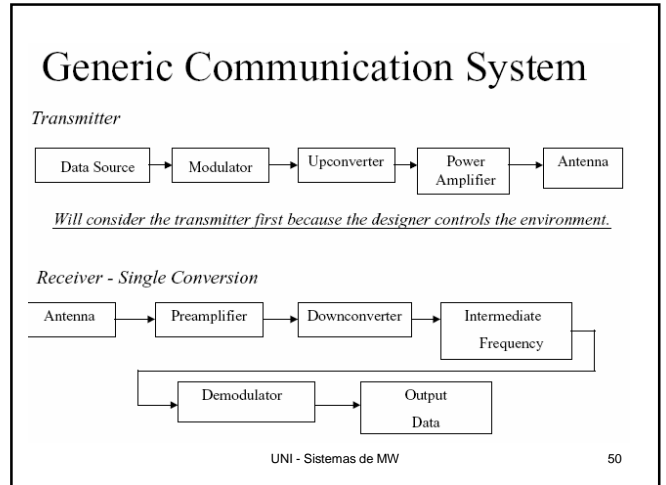
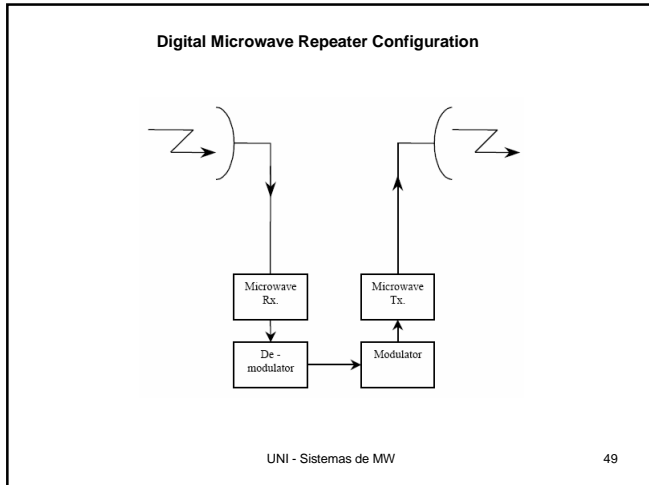
### The Components of a Digital Video Microwave Link:



UNI - Sistemas de MW

48





- ### Typical Modulation Formats
- AM (SSB, DSBSC) - requires linear amplifiers, high spectral efficiency, operates in weak signal conditions.
  - FM (NBFM, WBFM) - allows use of limiting amplifiers to suppress amplitude fluctuations, preferred over AM if SINAD > 12 dB.
  - FSK (mFSK) - operates with limiting amplifiers, uses simple demodulators.
  - PSK (BPSK, QPSK) - operates with limiting amplifiers, requires coherent (phase stable) demodulators.
  - QAM - Combination of AM and QPSK, requires linear amplifiers.
- UNI - Sistemas de MW 51

### SINAD

Usual Definition:

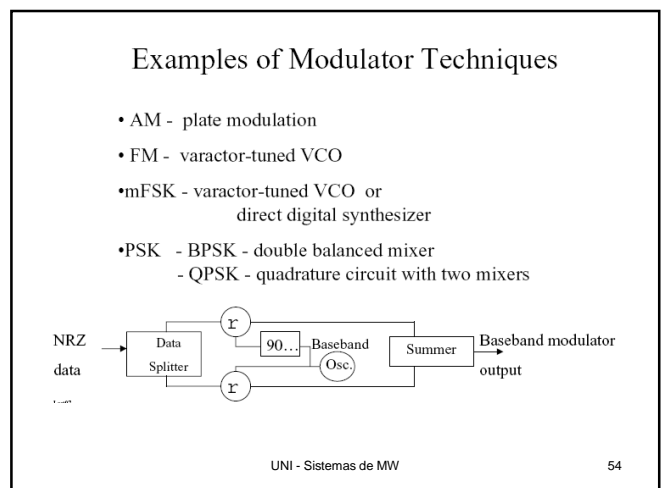
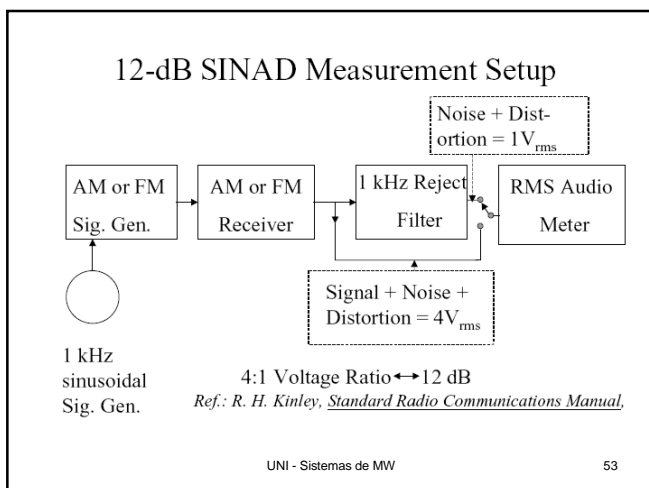
$$SINAD = \frac{Signal + Noise + Distortion}{Noise + Distortion}$$


---

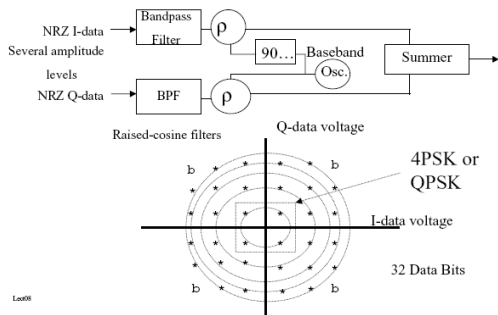
Roger's Definition recognizes the importance of interference in modern designs

$$SINAD = \frac{Signal + Interference + Noise + Distortion}{Interference + Noise + Distortion}$$

UNI - Sistemas de MW 52



QAM Modulator and Signal Constellation



Communication Channel Capacity

If Additive White Gaussian Noise (AWGN) only limits the channel, C. E. Shannon showed that error-free transmission was possible up to the channel

$$\text{capacity } (C - \text{symbols/sec}) = B_C \log_2 \left\{ 1 + \frac{E_b R}{N_o B_C} \right\},$$

where :  $B_C$  is the signal bandwidth (Hz)

$E_b$  is the energy per symbol (Joule or  $W \cdot \text{sec}$ )

$R$  is the symbol rate

$N_o$  is the single-sided noise power density (W/Hz)

Ideal Communication Channel Operating at Maximum Rate

At the maximum rate,

$$R = C = B_C \log_2 \left\{ 1 + \left( \frac{E_b}{N_o} \right) \left( \frac{R}{B_C} \right) \right\},$$

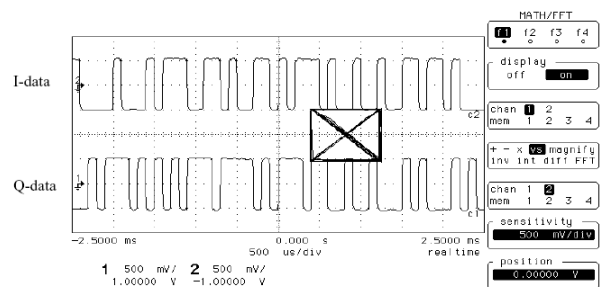
Solving for  $\frac{E_b}{N_o} = \frac{2^{R/B_C} - 1}{R/B_C}$  yields two regions.

If  $\frac{R}{B_C} > 1$  [bits/s/Hz], bandwidth is used efficiently

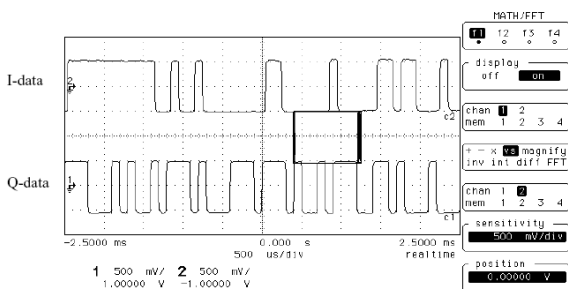
If  $\frac{R}{B_C} < 1$  [bits/s/Hz], power is used efficiently

When  $\frac{R}{B_C} \rightarrow 0$ ,  $\frac{E_b}{N_o} \approx -1.6$  dB

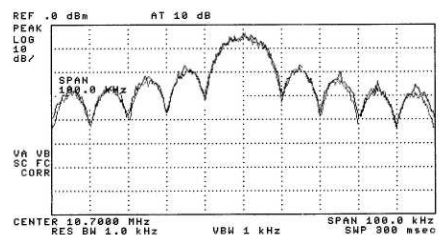
Input QPSK Data Constellation Digital - no offset



Input QPSK Data Constellation Digital - offset



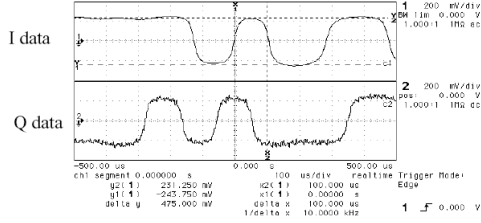
QPSK Spectrum for Digital Data with/without Offset



Note: Offsetting I and Q data bits does not affect spectrum for digital data.

### Input Bandwidth-limited Data Voltages versus Time

Note the smooth data transitions leading to much lower adjacent channel interference. I and Q data transitions offset.



UNI - Sistemas de MW

### Raised-cosine Filtering of Data

Minimizes zero-crossing jitter due to inter-symbol interference. Meets Nyquist criteria.

Equations for raised-cosine filter amplitude response:

$$S_{21} = 1 \quad \text{from DC to } (1 - \alpha) \frac{f_s}{2}$$

$$S_{21} = \cos^2 \left[ \frac{\pi}{4\alpha f_s} \left\{ 2f - (1 - \alpha)f_s \right\} \right]$$

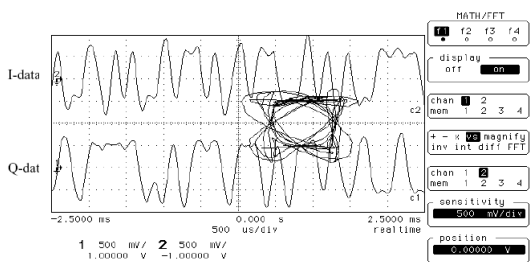
$$\text{from } (1 - \alpha) \frac{f_s}{2} \text{ to } (1 + \alpha) \frac{f_s}{2}$$

$$S_{21} = 0 \quad \text{from } (1 + \alpha) \frac{f_s}{2} \text{ to } f_s$$

where  $f_s$  is the symbol rate of the data (Hz),  $\alpha$  is a response variable, typically  $0.25 < \alpha < 1$ , and  $f$  is the frequency variable

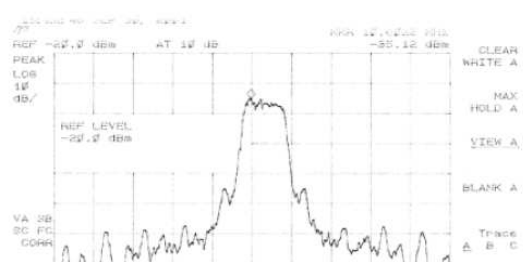
UNI - Sistemas de MW

### Input QPSK Data Constellation Analog - offset



UNI - Sistemas de MW

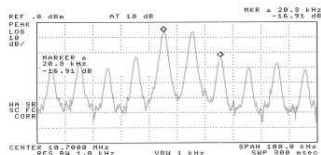
### QPSK Spectrum — Analog Data



UNI - Sistemas de MW

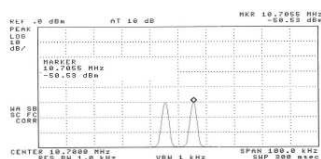
### Amplifier Input - Output Two-Tone Spectra

Output Tones



Note: Amplifier is in hard compression.

Input Tones



UNI - Sistemas de MW



**Muchas gracias por su atención**



UNI - Sistemas de MW