

# Modulação QAM

## QAM na transmissão de sinais digitais

- QAM é uma técnica atualmente utilizada tanto na modulação de sinais analógicos quanto de sinais digitais
- QAM quantizada é utilizada na transmissão de sinais digitais com alta taxa de transferência de informação.
- Aplicações principais: rádio digital, televisão digital HD, modems ADSL, WiFi, WiMAX, etc.
- Maior taxa de transmissão mantendo a mesma banda passante
- Eficiência Espectral: até 14 bits/s/Hz

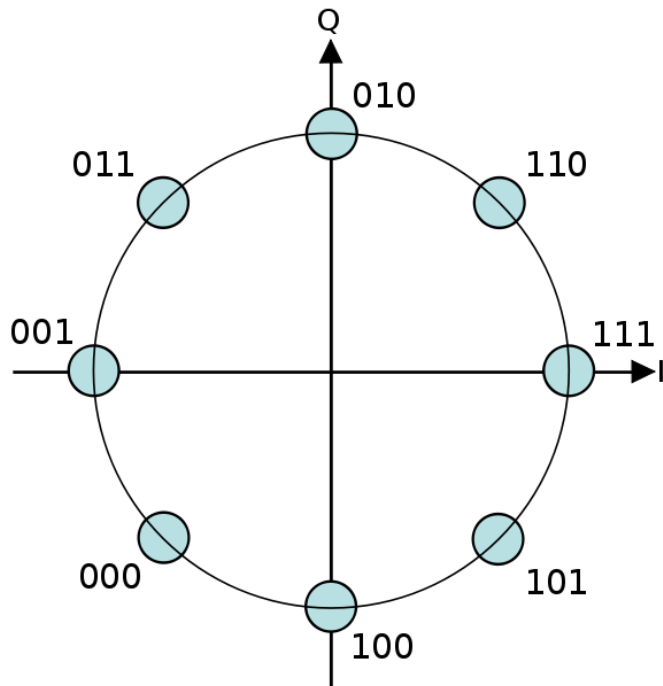
# Modulação QAM

## Diagrama de constelação

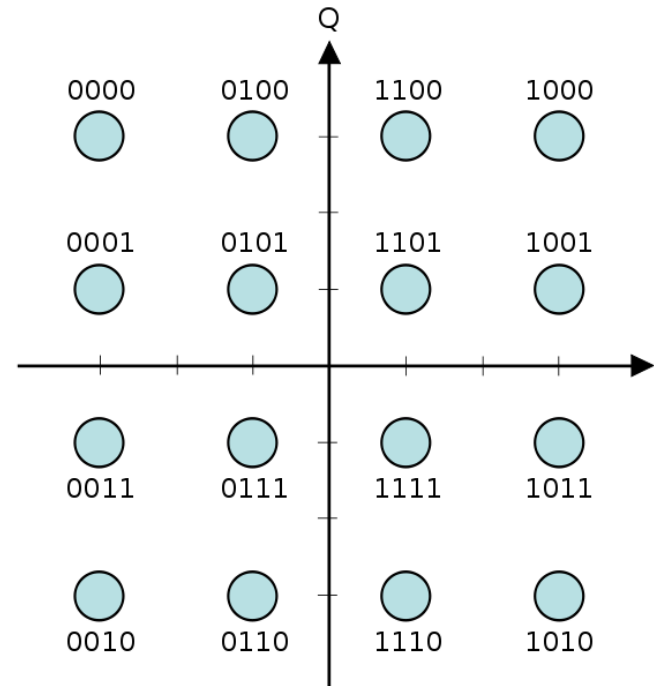
- Representação genérica de um sinal digital (símbolo) modulado
- mostra o sinal como um diagrama de dispersão bidimensional no plano complexo em instantes de amostragem de símbolo.
- Em cada instante de tempo o símbolo ocupa apenas uma posição no diagrama
- Plano complexo:
  - Eixo horizontal (real): sinal em fase ou “I”
  - Eixo vertical (imaginário): sinal em quadratura ou “Q”

# Modulação QAM

Exemplos de diagrama de constelação:



8-QPSK



16-QAM

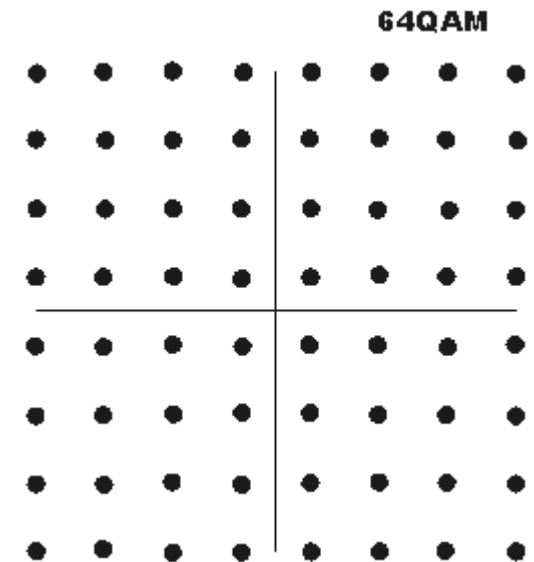
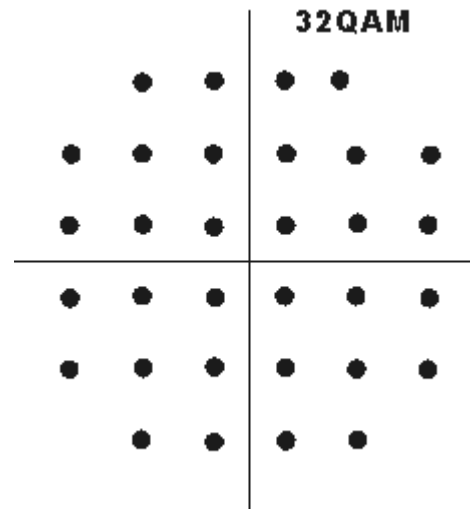
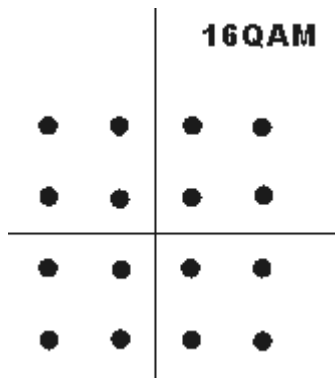
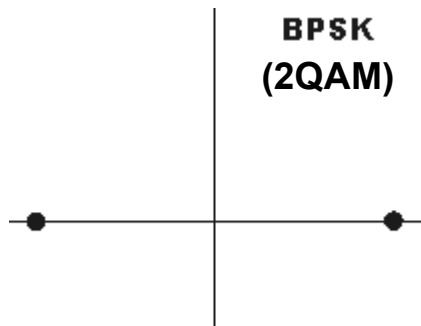
# Modulação QAM

## Diagrama de constelação

- Os pontos no diagrama são chamados pontos de constelação
- eles formam um conjunto de símbolos de modulação ( $M$ ) que compreendem o alfabeto de modulação
- A cada instante de tempo o módulo e a fase do sinal representam um único símbolo contido no alfabeto
- em telecomunicações digitais os dados são geralmente binários, o número de símbolos é uma potência de 2 (2, 4, 8, 16, ...)
- A modulação digital PSK é um caso particular da QAM onde o módulo do sinal modulado é constante, havendo alteração apenas na sua fase.

# Modulação QAM

Exemplos de diagrama de constelação:



# Modulação QAM

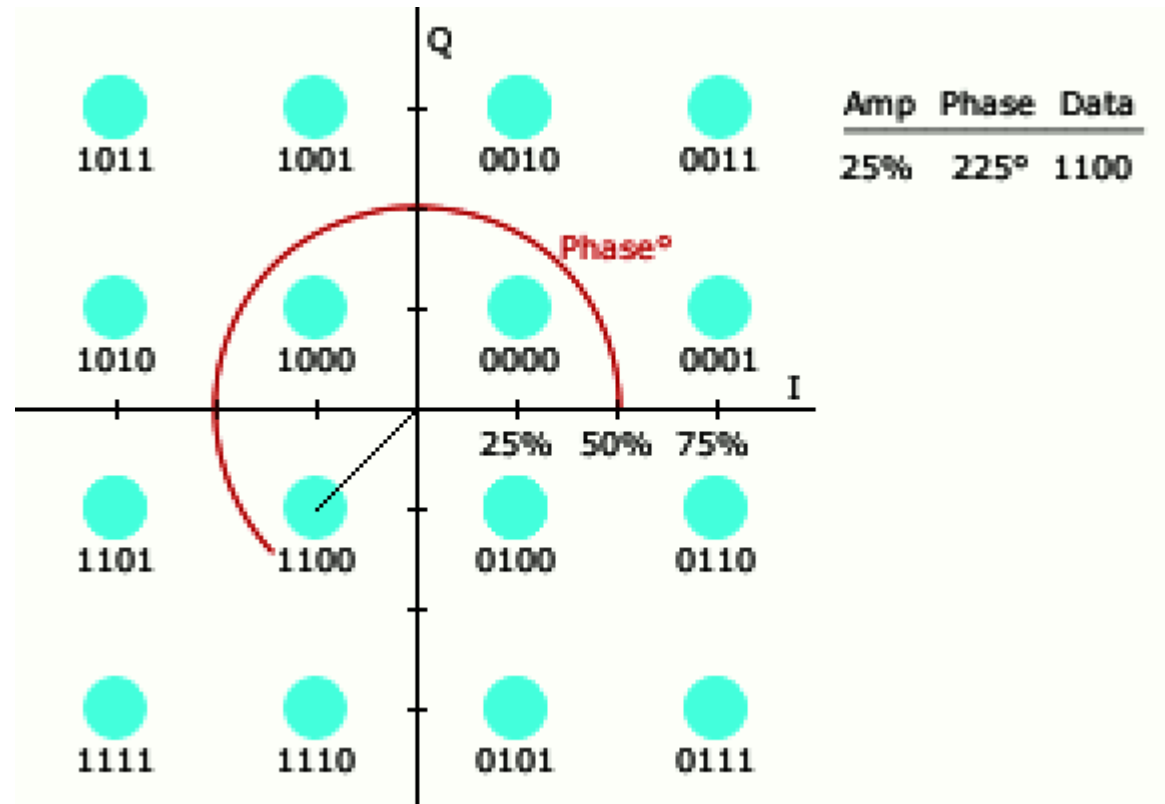
## Alfabeto da constelação: 16 QAM

Dado	I	Q	fase		Dado	I	Q	fase
0000	0,25	0,25	45°		1000	-0,25	0,25	135°
0001	0,75	0,25	23°		1001	-0,75	0,25	157°
0010	0,25	0,75	67°		1010	-0,25	0,75	113°
0011	0,75	0,75	45°		1011	-0,75	0,75	135°
0100	0,25	-0,25	315°		1100	-0,25	-0,25	225°
0101	0,75	-0,25	337°		1101	-0,75	-0,25	203°
0110	0,25	-0,75	293°		1110	-0,25	-0,75	247°
0111	0,75	-0,75	315°		1111	-0,75	-0,75	225°

# Modulação QAM

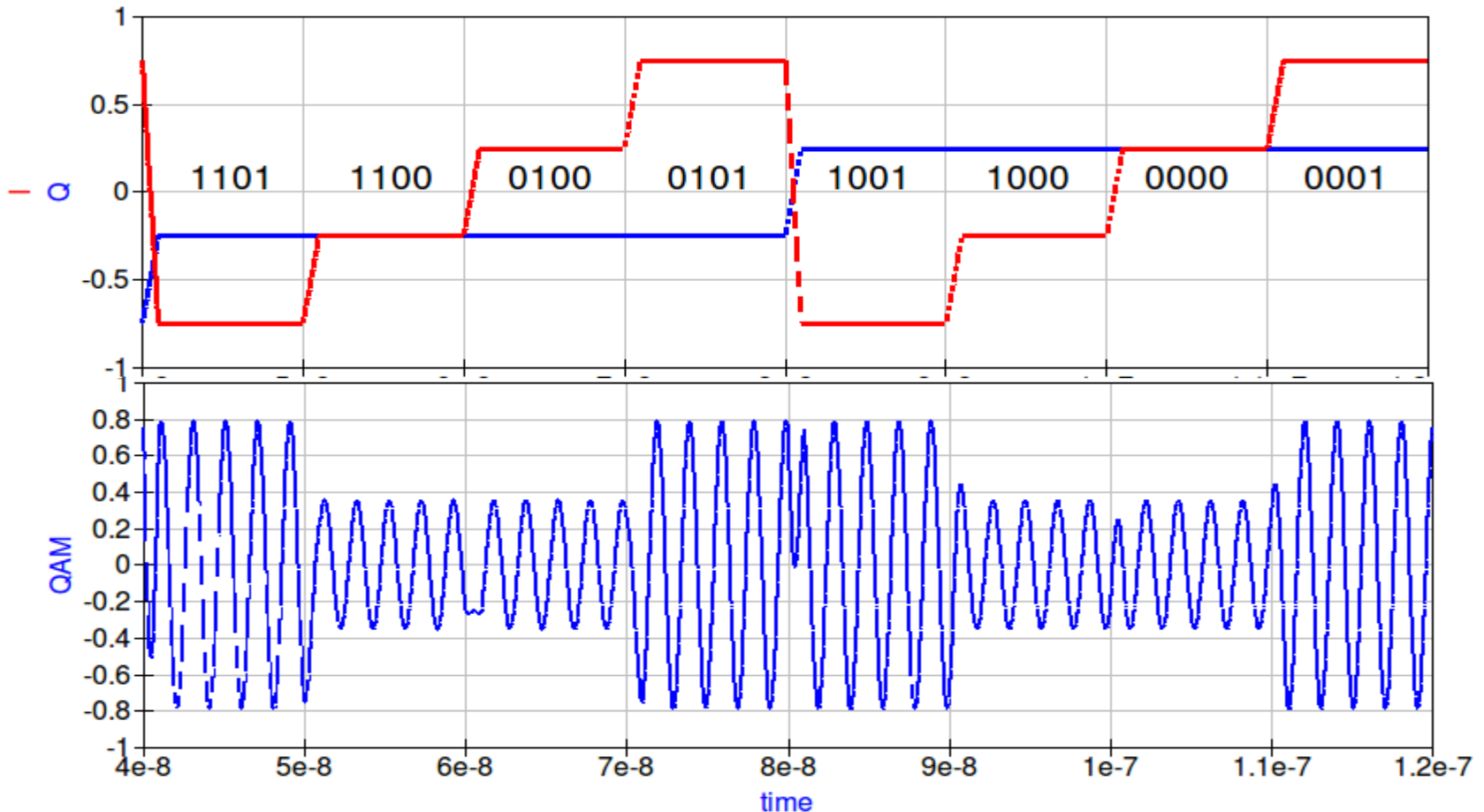
Exemplos de diagrama de constelação:

16-QAM



# Modulação QAM

Diagrama temporal:16-QAM





# Modulação QAM

Comparação de eficiência de transmissão:

MODULATION	BITS PER SYMBOL	SYMBOL RATE
BPSK (2QAM)	1	1 x bit rate
QPSK (4QAM)	2	1/2 bit rate
8PSK	3	1/3 bit rate
16QAM	4	1/4 bit rate
32QAM	5	1/5 bit rate
64QAM	6	1/6 bit rate
256QAM	8	1/8 bit rate
1024QAM	10	1/10 bit rate

# Modulação QAM

Diagrama em blocos do modulador QAM quantizado:



Legenda:

DSP: Digital Signal Processor

SerDes: Serializer-Deserializer

DUC: Digital Up Converter

CFR: Crest-factor Reduction

DAC: Digital to Analog Converter

PLL: Phase Locked Loop

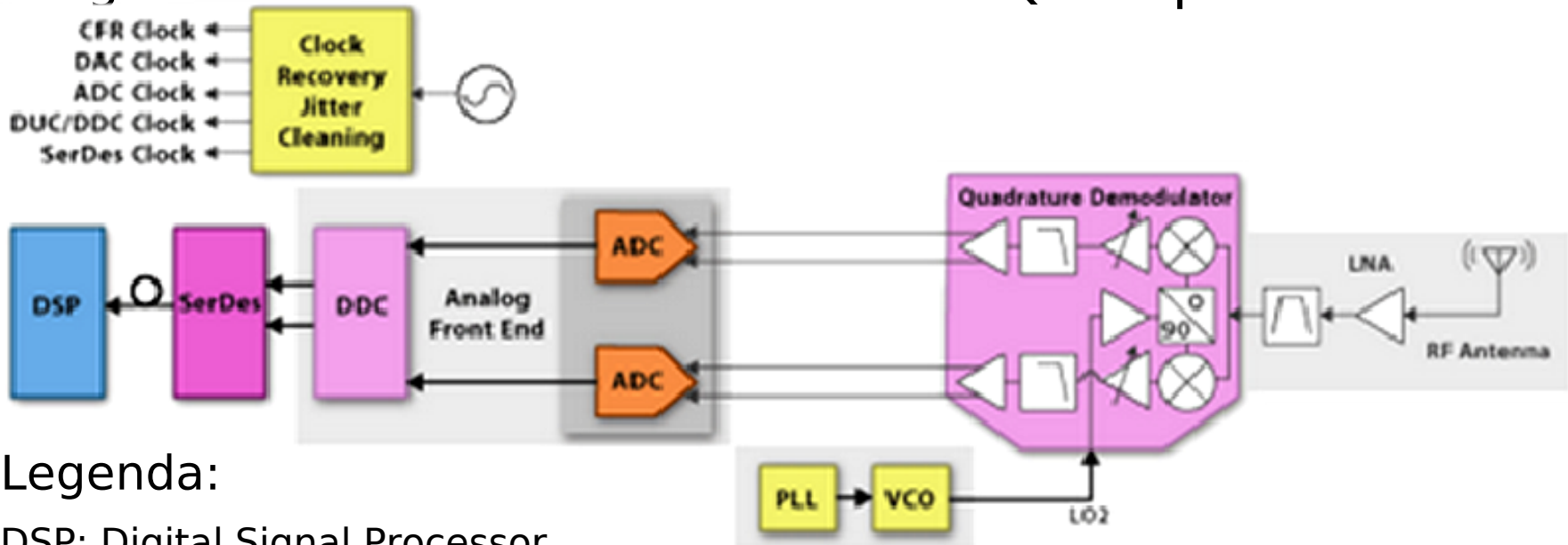
VCO: Voltage Controlled Oscillator

LO: Local Oscillator

PA: Power Amplifier

# Modulação QAM

Diagrama em blocos do demodulador QAM quantizado:



Legenda:

DSP: Digital Signal Processor

SerDes: Serializer-Deserializer

DDC: Digital Down Converter

ADC: Analog to Digital Converter

LO: Local Oscillator

LNA: Low Noise Amplifier

Jitter: Ruído de fase no oscilador

# Modulação QAM

Exemplos de aplicação:

Feature	WiMax (802.16a)	Wi-Fi (802.11b)	Wi-Fi (802.11a/g)
Channel Bandwidth	Adjustable 1.25 M to 20 MHz	25 MHz	20 MHz
Half/Full Duplex	Full	Half	Half
Bandwidth Efficiency	$\leq 5$ bps/Hz	$\leq 0.44$ bps/Hz	$\leq 2.7$ bps/Hz
Modulation	BPSK, QPSK, 16-, 64-, 256-QAM	QPSK	BPSK, QPSK, 16-, 64-QAM

# Modulação QAM

## Características e desempenho:

- Quanto maior o alfabeto (número de símbolos  $M$ ) da constelação:
  - maior a eficiência de transmissão
  - maior proximidade entre os símbolos distintos (amplitude e fase)
  - maior a probabilidade de erros
- QAM retangular: elementos da constelação formada por valores de I e Q que formam retângulos (ou quadrados) equidistantes
- QAM Circular: elementos da constelação formada por valores de I e Q que formam círculos equidistantes

# Modulação QAM

## Análise de desempenho:

- Para analisar qual o tipo de QAM mais adequado em dada aplicação é necessário conhecer:
  - $k$  = número de bits por símbolo
  - $E_b$  = Energia por-bit
  - $E_s$  = Energia por-símbolo
  - $N_0$  = Densidade espectral do ruído (W/Hz)
  - $P_b$  = Probabilidade de um bit errôneo
  - $P_{bc}$  = Probabilidade de um bit errôneo por portadora
  - $P_s$  = Probabilidade de um símbolo errôneo
  - $P_{sc}$  = Probabilidade de um símbolo errôneo por portadora

# Modulação QAM

Análise de desempenho: QAM retangular

Dados os valores de  $k$ ,  $E_b$ ,  $E_s$ ,  $N_0$ , pode-se determinar as demais características de desempenho:

$$P_{sc} = 2 \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3}{M-1} \frac{E_s}{N_0}} \right), \quad P_s = 1 - (1 - P_{sc})^2.$$

$$P_{bc} \approx P_{sc}/(k/2) = \frac{4}{k} \left( 1 - \frac{1}{\sqrt{M}} \right) Q \left( \sqrt{\frac{3k}{M-1} \frac{E_b}{N_0}} \right).$$

$$P_b = P_{bc}.$$

$$Q(x) = \frac{1}{2} \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{2}} \right)$$

# Modulação QAM

## Exercício 2:

Dado um modulador 64-QAM retangular com  $E_b = 3 \cdot 10^{-5}$  [W.s] e  $N_0 = 1 \cdot 10^{-6}$  [W/Hz], determine:

- o módulo e fase do vetor resultante para os símbolos: 101010 e 010101
- a probabilidade de bit e símbolos errôneos por portadora



# Modulação QAM

Função Erro complementar:  $\text{erfc}(x) = 1 - \text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt.$

Denota a probabilidade de (x) estar abaixo da curva de Gauss

x	erf(x)	erfc(x)	0.55	0.5633234	0.4366766	x	erf(x)	erfc(x)	2.40	0.9993115	0.0006885
0.00	0.0000000	1.0000000	0.60	0.6038561	0.3961439	1.30	0.9340079	0.0659921	2.50	0.9995930	0.0004070
0.05	0.0563720	0.9436280	0.65	0.6420293	0.3579707	1.40	0.9522851	0.0477149	2.60	0.9997640	0.0002360
0.10	0.1124629	0.8875371	0.70	0.6778012	0.3221988	1.50	0.9661051	0.0338949	2.70	0.9998657	0.0001343
0.15	0.1679960	0.8320040	0.75	0.7111556	0.2888444	1.60	0.9763484	0.0236516	2.80	0.9999250	0.0000750
0.20	0.2227026	0.7772974	0.80	0.7421010	0.2578990	1.70	0.9837905	0.0162095	2.90	0.9999589	0.0000411
0.25	0.2763264	0.7236736	0.85	0.7706681	0.2293319	1.80	0.9890905	0.0109095	3.00	0.9999779	0.0000221
0.30	0.3286268	0.6713732	0.90	0.7969082	0.2030918	1.90	0.9927904	0.0072096	3.10	0.9999884	0.0000116
0.35	0.3793821	0.6206179	0.95	0.8208908	0.1791092	2.00	0.9953223	0.0046777	3.20	0.9999940	0.0000060
0.40	0.4283924	0.5716076	1.00	0.8427008	0.1572992	2.10	0.9970205	0.0029795	3.30	0.9999969	0.0000031
0.45	0.4754817	0.5245183	1.10	0.8802051	0.1197949	2.20	0.9981372	0.0018628	3.40	0.9999985	0.0000015
0.50	0.5204999	0.4795001	1.20	0.9103140	0.0896860	2.30	0.9988568	0.0011432	3.50	0.9999993	0.0000007