



MESTRADO INTEGRADO EM ENGENHARIA ELECTROTÉCNICA E DE
COMPUTADORES

SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE PROCESSAMENTO DE SINAL

BPSK Modem

Grupo n.º 2/3

André Filipe Barroso Cerqueira n.º 65144

Guilherme Branco Teixeira n.º 70214

João André Catarino Pereira n.º 73527

segunda-feira 15h30 - 18h30, LE1

Lisboa, 17 de Abril de 2015

Conteúdo

1	Introdução	1
2	Projecto	1
2.1	Projectos de Demonstração	1
2.1.1	sine8_buf	1
2.1.2	loop_intr	1
2.2	BPSK	2
2.2.1	P1. Oscilador controlado numericamente	2
2.2.2	P2. Transmissor BPSK	7
3	Conclusão	10
4	Anexos	10

¹As linhas de código apresentadas durante o relatório têm como objectivo demonstrar a maneira de raciocinar na resolução de problemas, não representando uma cópia exata do código usado em laboratório, podendo até, serem consideradas *pseudo-código*

1 Introdução

Este trabalho consiste na primeira parte do projecto de laboratório da cadeira: desenvolvimento de um modem de *Binary Phase Shift Keying* (BPSK).

Teve como objectivo a familiarização com o ambiente de desenvolvimento integrado de DSP que consiste nas placas de desenvolvimento DSK TMS320C6416 e DSK TMS320C6713 da *Texas Instruments* e no software de desenvolvimento *CodeComposerStudiov5.5*. Para tal correram-se dois projectos exemplo (sine8_buf e loop_intr) e, usando as ferramentas de debug, alteraram-se certos parâmetros de forma a observar os efeitos nos sinais resultantes. Também se consolidaram os conhecimentos adquiridos desenvolvendo dois mini projectos: um oscilador sinusoidal controlado numericamente e o modulador do modem BPSK.

2 Projeto

2.1 Projectos de Demonstração

- Resumo das funções e os seus objectivos com especial importancia ao loop
- Relaciona-las com as suas utilizações no projecto em si

2.1.1 sine8_buf

O objectivo deste projeto é representar a função sinusoidal, multiplicada por um determinado ganho, através de um conjunto de amostras que equivalem a um período da mesma, repetindo nos períodos seguintes esse mesmo conjunto. Este procedimento é realizado através da rotina de interrupção presente no programa.

Ao analisar o código deste projeto à primeira vista podemos concluir logo que este usa uma frequência de amostragem de 8 kHz , tem um ganho $G = 10$ predefinido e usa 8 amostras para representar a sinusoide. Depois de observar a sinusoide no osciloscópio variou-se o ganho a fim de perceber a sua influência e também o seu limite.

Para compreender o limite desta sinusoide é necessário ter em conta que se usa o formato de vírgula fixa Q15 para as amostras da sinusoide. Este formato tem como limite o valor $(2^{15} - 1) = 32767$. Considerando o valor máximo da sinusoide, se multiplicarmos a mesma por um ganho G=33 obtemos um valor superior ao permitido pelo formato Q15, fazendo com que nesses pontos o valor da sinusoide "caia".

2.1.2 loop_intr

Este projeto tem como objectivo fornecer-nos um template para os próximos projetos, em termos de comunicação com a placa e rotina de interrupção. Pode-se observar nas últimas linhas de código como se liga os sinais de entrada e saída aos canais da placa.

No projeto anterior observou-se os efeitos de overflow de uma variável. Neste observam-se os efeitos de aliasing (ou não, não me recordo se o DSP tem um filtro anti-aliasing à entrada) devido ao sinal de line-in ter a mesma frequência que a frequência de amostragem. Se havia anti-aliasing, a partir dos 4khz deixariamos de ver uma sinusoide com os 3.3V. Não fizemos a experiência de mudar para sinal quadrado e variar a frequência, mas provavelmente não íamos ver um sinal quadrado pois o espectro (infinito) deste teria que ser filtrado pelo anti-aliasing filter.

2.2 BPSK

Este projeto é constituído por duas partes, a primeira é um oscilador controlado numericamente e a segunda é um transmissor BPSK.

2.2.1 P1. Oscilador controlado numericamente

Usa-se o projeto descrito na secção 2.1.2 como base para a construção de um oscilador controlado numericamente (*NCO*). Um *NCO* é um gerador de sinal digital que cria uma forma de onda discretamente representada no tempo e na amplitude. O *NCO* terá as seguintes características:

Tabela 1: Características do *NCO* a construir.

Parâmetro	Símbolo	Valor
Frequência de amostragem	f_s	16kHz
Frequência mínima	f_{min}	2kHz
Frequência máxima	f_{max}	6kHz

O projeto de construir o *NCO* seguiu os seguintes passos que estão posteriormente desmitigados:

1. Oscilador de Relaxamento (Integrador de Rampa).
2. Look-up-table (LUT).
3. Obtenção do sinal sinusoidal através da LUT.
4. Criação de duas variáveis para controlar a frequência e amplitude do sinal sinusoidal.
5. Utilização do sinal de entrada para controlar a frequência do sinal.
6. Teste do oscilador com uma onda quadrada à entrada para observar o sinal modulado.
7. Melhoria da qualidade do oscilador com interpolação linear.
8. Comparaçao dos espectros com e sem interpolação.

P1-1

Visto que a placa usada no laboratório (DSK TMS320C6713) tem 1V de amplitude máxima na saída, foi usado o formato Q15 para representar o sinal de saída, pois um sinal representado em Q15 tem amplitude máxima de $2^{15} - 1 = 32767$.

Para construir um Oscilador de Relaxamento foi criado um programa que aumenta por a cada ciclo o sinal à saída de modo a que este tenha o comportamento de uma rampa. Este incremento tem de tomar um valor, que por agora se vai considerar constante, tal que 32767 seja seu múltiplo. Ao verificar a tabela 1, podemos chegar aos seguintes valores de incremento com as suas frequências correspondentes:

Tabela 2: Valores a atribuir ao incremento do sinal na saída.

Frequência de saída(f_0)	Incremento(Δ)
$2kHz$ (f_{min})	8192
$4kHz$	16384
$6kHz$ (f_{max})	24576

Os valores calculados na tabela 2 foram calculados através da seguinte fórmula:

$$f_0 = \frac{\Delta}{2A} f_s \Leftrightarrow \Delta = 2A \frac{f_0}{f_s} , A = 32767 \quad (1)$$

Foi então possível obter as seguintes rampas com diferentes frequências:

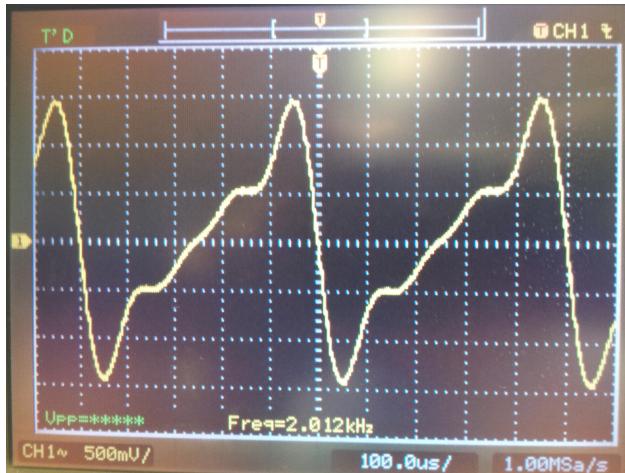


Figura 1: Rampa com frequência de $2kHz$

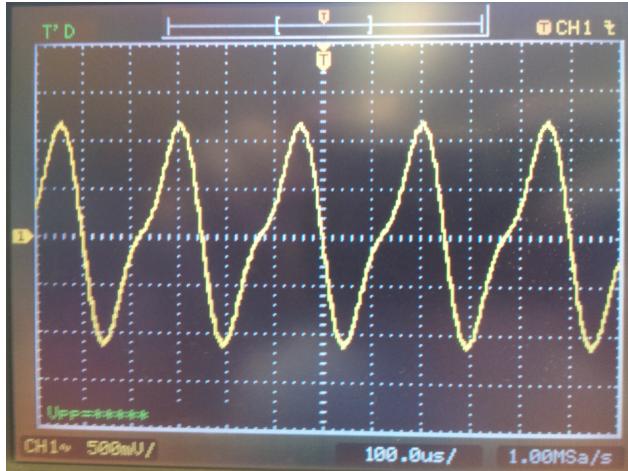


Figura 2: Rampa com frequência de $4kHz$

Ao observar as duas rampas pode-se constatar que para uma frequência mais baixa, ou seja, um incremento menor, a rampa apresenta mais "degraus" e um menor declive. Como a mesma está representada em Q15, só pode variar dentro do intervalo compreendido nesse formato, de maneira que um incremento menor na rampa fornece mais amostras da mesma dentro do intervalo possível, o que significa um menor declive menor.

P1-2

Foi criada uma tabela (LUT) com os valores em Q15 de meio ciclo de um seno de modo a que seja possível ir retirar os seus valores para criar um sinal sinusoidal. Esta tabela tem 32 valores e foi construída com a seguinte equação:

$$32767 * \sin \frac{n\pi}{32}, \quad n = 0, 1, 2, \dots, 31 \quad (2)$$

Para calcular apenas meio ciclo do seno, é necessário ter 32 valores pertencentes ao intervalo $[0, \pi]$ na fase. Assim, é necessário restringir a fase a esse intervalo através da divisão observada na equação, $\frac{n\pi}{32}$. O produto do seno pelo valor 32767 é a conversão do seno para Q15. Não se multiplica por $2^{15} = 32768$ pois os sinais estão em complemento para dois, o que significa que para o máximo do seno, esta LUT ultrapassaria o limite do formato, o que causaria o corte dessa amostra no sinal.

P1-3

Usando como base as rampas criadas na secção 2.2.1 como método de indexação, foi possível criar um sinal de uma sinusoide através da tabela de LUT criada na secção 2.2.1.

Para a indexação são usados os 5 bits mais significativos (excluindo o bit de sinal) do sinal da rampa, esses 5 bits irão indexar e escolher qual o valor da tabela de LUT a usar para criar a sinusoide. Este processo foi efetuado com o seguinte pedaço de código dentro do ciclo:

```
rampa=rampa+incremento;      // Criar a rampa
index=rampa>>10;
index=31 & index;           // Usar apenas 5 bits
```

```
sinusoide=LUT[ index ];
```

O resultado foi o que se pode observar na seguinte figura:

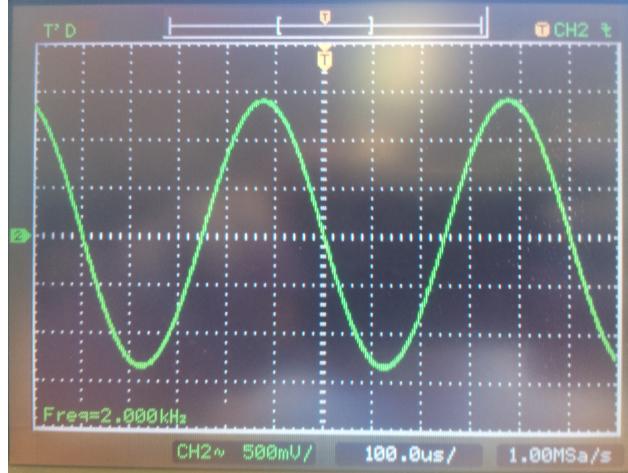


Figura 3: Sinal sinusoidal criado de 2kHz.

Como se pode observar na figura foi possível criar um sinal sinusoide usando uma rampa e uma tabela com valores de seno.

P1-4

Foram criadas duas variáveis para fosse possível controlar a frequência e a amplitude do sinal à saída, *incremento* e *amplitude*, respectivamente.

A primeira variável foi já antes referida, nas secções 2.2.1 e 2.2.1. Esta variável, caso alterada iria alterar a frequência da rampa, e por consequência, a frequência do sinal de saída. Como se pode observar na tabela 2, esta variável terá como limite máximo o valor 24576 e como limite mínimo 8192. Podemos também concluir que quanto maior for esta variável, maior a frequência do sinal de saída, tal como se o seu valor diminuir, a frequência de saída irá diminuir também.

A segunda variável (*amplitude*) foi criada com o propósito de modelar a amplitude do sinal de saída, esta causou mudanças mais significativas no código, tal como se pode verificar:

```
rampa=rampa+incremento;
index=rampa>>10;
index=31 & index;
aux=amplitude*LUT[ index ];
aux=aux<<1;           // Retirar bit de sinal extra
sinusoide=-aux>>16;   // Colocar a variavel com 16 bits em Q15
```

Esta variável tem como valor máximo 32767, pois os valores afixados na tabela LUT já apresentam um valor com a amplitude máxima de Q15, não tendo assim problemas em relação ao formato de representação nem à amplitude do sinal transmitido à placa.

Deste modo foi possível ter duas variáveis, *incremento* e *amplitude*, que modelavam a frequência e a amplitude do sinal de saída respectivamente.

P1-5

Para que a frequência do sinal de saída seja modelado através da amplitude do sinal de entrada, o sinal de entrada terá de controlar a variável *incremento*.

Um exemplo de garantir que isto era possível era receber um novo valor para a variável *incremento*, sendo que este valor vinha diretamente da entrada:

```
incremento=−inbuf;  
rampa=rampa+incremento;  
(...)
```

Deste modo, quando se aumentava a amplitude do sinal de entrada, a variável *incremento* aumentava, e por consequência também aumentava a frequência de entrada.

P1-6

P1-7

Com o objectivo de melhorar a qualidade do sinal criado vai ser usado o método de interpolação linear descrito na seguinte equação:

$$y = y_1 + (y_2 - y_1) * \delta_x \quad (3)$$

Sendo que δ_x refere-se aos 10 bits menos significativos ignorados na altura em que se retira o valor *index* com o propósito de indexação. O processo de recolher o valor de δ_x e do cálculo da interpolação estão descrito nas seguintes linhas de código:

```
rampa=rampa+delta;  
deltaX=1023 & rampa; // Retirar os 10 bits menos significativos  
deltaX=deltaX<<5; // Representar deltax em Q15  
index=rampa>>10;  
index=31 & index;  
aux=amplitude*LUT[index];  
aux=aux<<1;  
sinusoide=−aux>>16;  
Y1=sinusoide;  
aux=amplitude*LUT[index+1];  
aux=aux<<1;  
Y2=aux>>16;  
aux=(Y2−Y1)*deltaX;  
aux=aux<<1;  
Y=Y1+(aux>>16);
```

Sendo que o sinal Y corresponde ao sinal com maior qualidade, ou seja, interpolado, e que o sinal *sinusoide* corresponde ao sinal com menor qualidade.

Ambos os sinais podem ser observados na imagem ??, embora a sua comparação não poderá ser efetuada na sua observação.

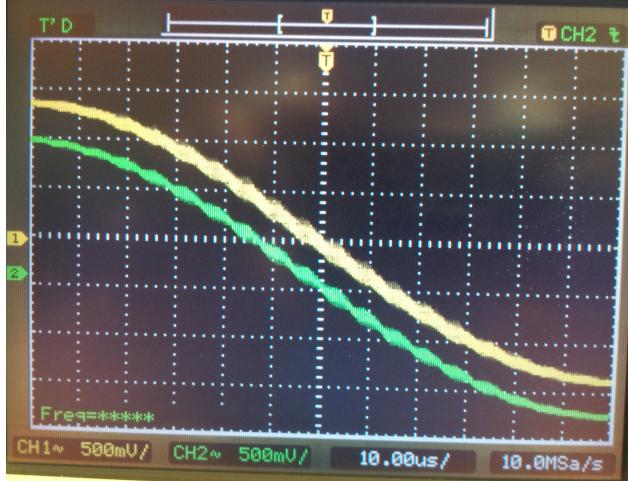


Figura 4: Sinal sinusoide com interpolação e sem interpolação.

P1-8

2.2.2 P2. Transmissor BPSK

O objectivo deste projeto é criar um transmissor BPSK com recurso a três elementos principais, uma fonte de bits, um codificador diferencial e mapeador, e um modulador. Neste projeto foi utilizada uma frequência de amostragem $f_s = 16$ kHz e uma frequência portadora $f_0 = 4$ kHz.

Para ter uma fonte de bits no transmissor usa-se um "bit-rate clock" cuja função vai ser criar uma sequência de bits b_n com $f_b = 1$ kbps. Isto significa que, considerando f_s , a cada 16 ciclos é gerado um novo bit, alternado em relação ao anterior. Assim, implementou-se um contador que é incrementado em cada ciclo e que tem uma condição para verificar quando chegar ao valor 16. Ao entrar nessa condição é implementada a lógica para cálculo do novo bit da sequência e o contador é reiniciado.

Para calcular o novo bit, basta negar o bit anteriormente obtido para obter uma sequência de bits alternada, tendo sido concretizado através de uma simples XOR:

$$b_n = b_{n-1} \oplus 1 \quad (4)$$

Com esta operação, o bit resultante será sempre alternado em relação ao anterior. Assim, obtém-se uma onda quadrada, observada no osciloscópio, que varia entre "0" e "1" e representa b_n com uma frequência de 500 Hz (ver figura com bn). Esta frequência ocorre devido a dividir-se f_b por dois pois cada meio ciclo da onda quadrada corresponde a um bit.

Após obter a fonte de bits passou-se ao segundo elemento do transmissor: o codificador diferencial e mapeador. Começando pelo codificador diferencial, este serve para evitar ambiguidades na fase de

maneira a poder sempre recuperar uma sequência de bits num canal que tenha sofrido uma variação na fase. A codificação de b_n resulta também de uma operação lógica XOR, como se pode observar:

$$c_n = c_{n-1} \oplus b_n , c_0 = 0 \quad (5)$$

Como um bit novo só quando o contador chega ao valor 16, o mesmo também só é codificado nessa condição, ou seja, a cada 16 ciclos é codificado um bit.

Tal como em b_n também c_n é representado por uma onda quadrada que varia entre "0" e "1" só que com o dobro do período, devido a só ter dois resultados para os quatro casos possíveis da XOR que realiza a codificação (figura X).

IMAGEM bn com cn

Depois de obter c_n passa-se ao mapeamento do mesmo. O mapeamento baseia-se em duas condições:

$$c_n = '1' \rightarrow d_n = +1 \quad c_n = '0' \rightarrow d_n = -1 \quad (6)$$

Esta lógica podia ser facilmente implementada com recurso a duas condições "if", mas optou-se por evitar essa lógica para tornar o programa mais eficiente. Assim recorreu-se a um shift e a uma subtração. Atenção que esta não é a maneira mais eficiente pois a subtração faz com que o programa tenha de passar pela ALU. Pode-se observar então o mapeamento efetuado através da seguinte expressão:

$$d_n = 32767 * ((c_n << 1) - 1) \quad (7)$$

Antes de mais, o ganho que está a ser multiplicado é utilizado devido ao elemento modulador do transmissor, que vai ser falado a seguir. Considerando a expressão sem esse ganho, vê-se que para $c_n = 0$, como o shift não influencia o resultado, o mesmo só depende da subtração e é sempre o pretendido, $d_n = -1$. Se $c_n = 1$, o shift duplica esse valor, e depois ao subtrair obtém-se $d_n = 1$.

Tal como em b_n e c_n esta operação só é executada a cada 16 ciclos pois depende diretamente de c_n e só se mapeia um novo bit depois de ele ser codificado. Concluído o mapeamento obtém-se mais uma vez uma onda quadrada mas desta vez varia entre -1" e "1" (figura X).

IMAGEM cn com dn

P2-2 Falta agora gerar a onda portadora a modular. Esta foi implementada de forma mais simples face ao projeto anterior uma vez que a frequência é estática (4 kHz) e este valor consiste numa fração inteira da frequência de amostragem (16kHz). Em primeiro lugar criou-se uma tabela com quatro valores dum período da sinusóide, sendo esta:

Tabela 3: Amostras da onda portadora

contador	seno
0	0
1	32767
2	0
3	-32767

Escolheram-se estes valores uma vez que o período de amostragem coincide com os instantes de máximo, mínimo e zero-crossing da portadora. Para gerar a portadora (figura X) recorre-se a um contador que, em cada interrupção (ocorrendo em cada instante de amostragem, como explicado no enunciado), aponta para cada entrada da tabela e põe a amostra numa variável que, após se incrementar o contador, irá ser multiplicada por d_n . Esta tabela não gera uma onda triangular pois das harmónicas destas, abaixo da frequência de amostragem ($f_0=4\text{kHz}$ e $3f_0=12\text{kHz}$) apenas a primeira harmónica se encontra na banda de passagem do filtro de reconstrução do DAC, que terá frequência de corte $F_s/2$.

IMAGEM com portadora

A onda modulada é então representada pela seguinte expressão:

$$s_n = d_n \sin(2\pi f_0 T_s n) \quad (8)$$

Neste caso os valores do seno são os valores das amostras discutidas anteriormente. Tem-se dois sinais Q15, ou seja o bit mais significativo para o sinal e 15 bits para a parte fracionária. Ao multiplicar-se dois sinais Q15 sabe-se que o resultado será sempre Q15, contudo como o multiplicador retorna um valor em Q30, para este ser armazenado tem que se fazer shift left uma vez para eliminar o sinal repetido e shift right 16 vezes para transportar os bits mais significativos encostar os bits do resultado nos bits menos significativos para se truncar

P2-3 Após implementar o modulador, tem-se o transmissor BPSK completo e para testá-lo, pôs-se nos dois canais do osciloscópio a onda portadora e a onda modulada (figura Y).

IMAGEM portadora com modulada

Como se pode observar pela imagem e considerando a expressão (8), a onda portadora começa em oposição de fase com a onda modulada. Isto ocorre quando $d_n = -1$, o que significa que quando $d_n = 1$ a onda modulada é igual à portadora. É possível observar quando d_n muda de valor pois é exatamente quando a onda modulada inverte a sua direção (figura Z).

("a sua direção"é uma boa maneira de explicar?)

IMAGEM com dn e onda modulada

Este fenómeno acontece a cada 8 ciclos pois como já foi explicado anteriormente tem-se um bit-rate dividido por dois que acaba por influenciar d_n e que...

Espectro

Modulação=> tempo: é multiplicação da onda quadrada com a sinusoide. Na frequência: as harmónicas ímpares (espectro quadrada) convoluídas com dirac a 4kHz(espectro portadora). Na imagem o espectro da quadrada centrada em 4khz como se esperava. As harmónicas estão espaçadas 500Hz pois o sinal d_n consiste numa onda quadrada de frequência fundamental 250 Hz.

3 Conclusão

-Principais resultados e conclusões sobre eles, erros a corrigir (se houverem), o que melhorar

4 Anexos

-Código?

-possivelmente pode-se aqui algumas das imagens