Rádio de Conversão Direta: Como a Matemática Substituiu o Super-heteródino



https://youtu.be/ojZ2oROBZYY

Descrição

Fala pessoal, aqui é o Professor Bairros. Será que o rádio receptor dos dias de hoje ainda usa o princípio clássico do super-heteródino cheio de bobinas e canequinhas de FI? Neste tutorial de bancada nós vamos analisar os equipamentos modernos como smartphones, roteadores Wi-Fi e drones para descobrir que a engenharia de telecomunicações mudou drasticamente as regras do jogo. Vamos entender juntos como a arquitetura de conversão direta e o rádio definido por software esmagam o sinal da antena direto para a banda base. Vou destrinchar a matemática do misturador de RF e mostrar como os semicondutores separam os sinais em fase e quadratura para os conversores analógico-digitais. Diga aí nos comentários se você conhecia a conversão direta dos rádios digitais modernos.

Hashtags para adicionar na descrição: #SDR #RadioDefinidoPorSoftware #SuperHeterodino #ProfessorBairros #EletronicaDeBancada #Telecomunicacoes

www.bairrospd.com

VISITE O SITE DO PROFESSOR BAIRROS LÁ EM O PDF E MUITO MAIS.
PARA AULAS ONLINE CONTATE VIA SITE.
www.bairrospd.com

https://www.youtube.com/@professorbairros



Sumário

Rádio de Conversão Direta: Como a Matemática Substituiu o Super-heteródino 1
1.1. Introdução. 4
1.2. A conversão direta. 6
1.3. Os sinais em fase e quadratura. 7
1.4. O circuito. 8
1.5. A matemática. 9
1.6. O misturador na via I 10
1.7. O misturador na via Q 12
1.8. Conclusão. 13

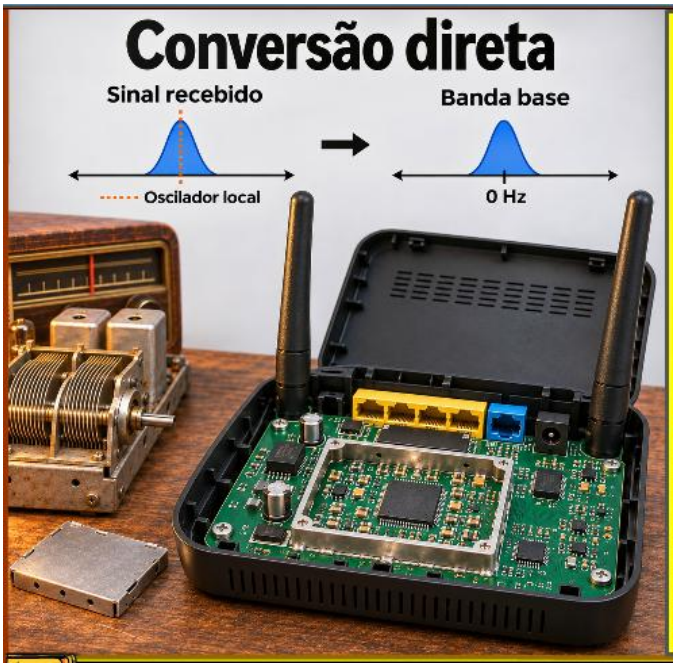
1.1. Introdução.



Sim, queridos seguidores.

Será que o rádio receptor dos dias de hoje ainda usa o princípio do rádio super-heteródino? Se você é como eu, que sempre teve essa dúvida, então esse vídeo é para você, vamos lá responder essa dúvida....

1.2. A conversão direta.

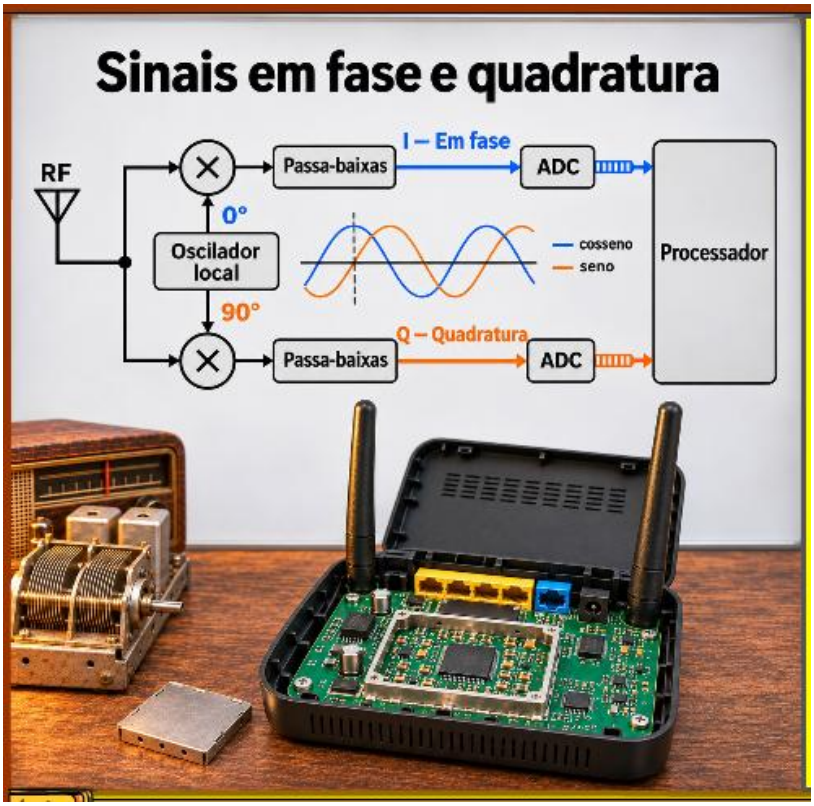


O super-heteródino foi o rei absoluto da nossa bancada por quase um século, mas a engenharia de telecomunicações moderna precisou mudar drasticamente as regras do jogo.

Hoje, se você abrir a blindagem metálica de um roteador Wi-Fi, de um módulo Bluetooth ou do circuito de radiofrequência do seu smartphone, você não vai encontrar absolutamente nenhuma daquelas famosas canequinhas de Frequência Intermediária ou capacitores variáveis.

O que domina os projetos comerciais atuais é uma arquitetura chamada de Conversão Direta, também conhecida como Frequência Intermediária Zero, trabalhando de mãos dadas com o processamento de Rádio Definido por Software. Acontece que a física da heterodinação inventada por Armstrong continua valendo, mas a execução prática foi forçada a evoluir porque é fisicamente impossível fabricar um transformador sintonizado com bobinas e núcleos de ferrite dentro de uma pastilha microscópica de silício. A solução genial da engenharia contemporânea foi ajustar o oscilador local para bater exatamente na mesma frequência da portadora da estação que queremos sintonizar, em vez de manter aquele clássico desvio fixo de 455 kilohertz.

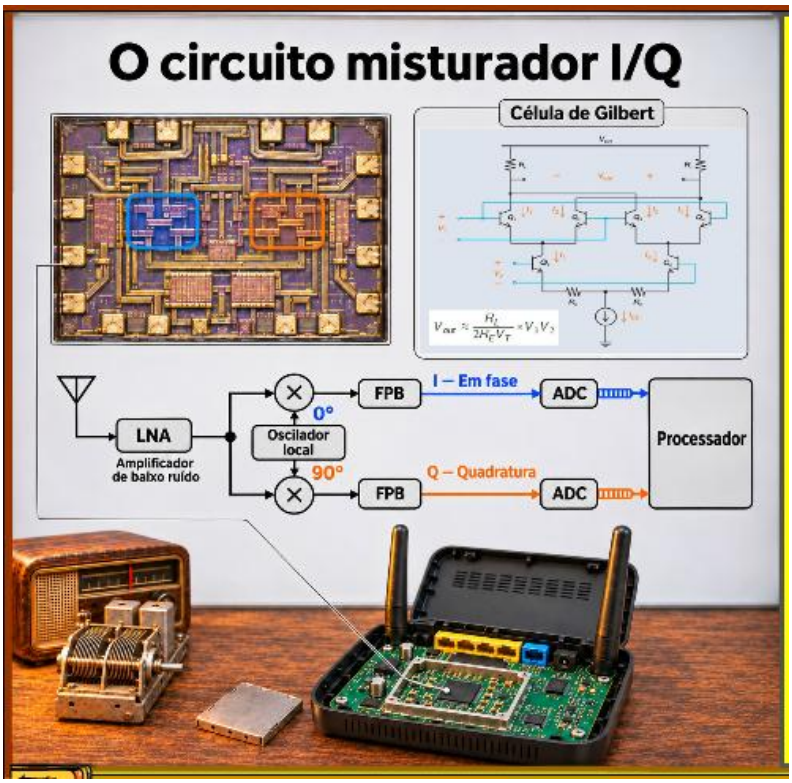
1.3. Os sinais em fase e quadratura.



Quando você subtrai a frequência da antena pela mesma frequência exata do oscilador local lá dentro da pastilha de silício, a diferença matemática cai para zero hertz. Isso significa que o sinal de rádio de altíssima frequência é esmagado instantaneamente direto para a banda base, caindo logo de cara nas frequências baixas de áudio ou de dados puros.

Como essa matemática de subtração direta gera um problema técnico grave de cancelamento e perda de informação de fase, como solucionar? o chip divide o sinal da antena em dois caminhos logo na entrada, misturando-os com dois sinais do oscilador local que estão defasados entre si em noventa graus. Essa jogada de mestre gera os famosos sinais I e Q, que significam Em Fase e Quadratura. Esses dois canais de áudio de banda base saem dos misturadores e são imediatamente engolidos por um par de conversores analógico-digitais de altíssima velocidade. A partir desse exato milissegundo, a radiofrequência deixa de ser manipulada por um circuito elétrico e passa a ser simplesmente um fluxo de código de programação rodando dentro de um processador.

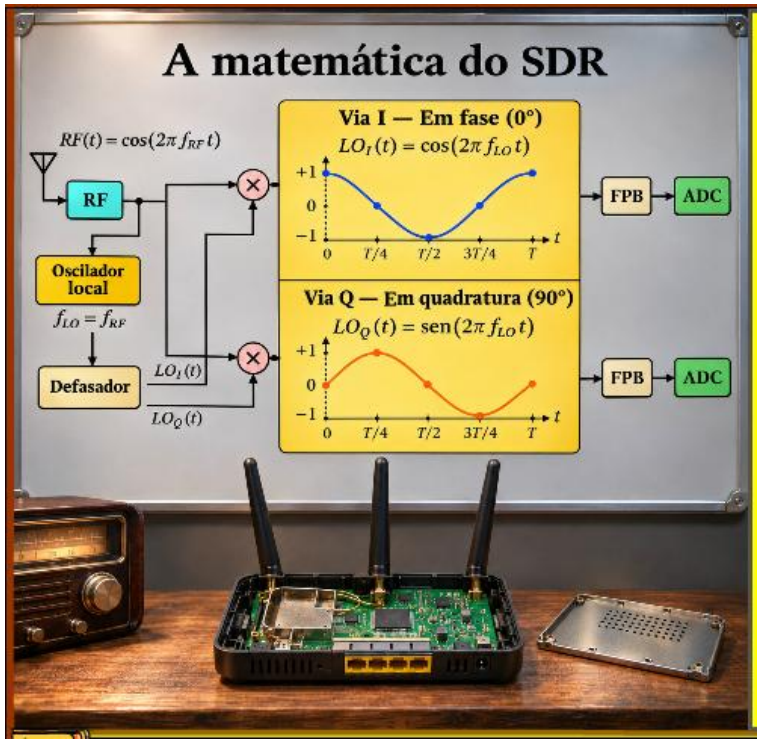
1.4. O circuito.



A matemática do misturador em fase e quadratura I/Q parece bruxaria, mas na verdade é só a boa e velha trigonometria que a gente estudava no colégio, aplicada com uma dose de genialidade na bancada.

Respondendo direto à sua dúvida, aquele primeiro misturador em fase e quadratura I/Q que recebe o sinal espremido da antena e do amplificador LNA (Low-Noise Amplifier ou amplificador de baixo ruído) é puramente físico, feito de semicondutores. Ele é forjado em silício, geralmente usando topologias clássicas de transistores como a célula multiplicadora de Gilbert, um verdadeiro computador analógico, tudo rodando em frequências altíssimas onde nenhum código de computador conseguiria acompanhar o ritmo é a boa e velha eletrônica analógica preparando tudo. O software só entra no palco depois que esse misturador físico faz o trabalho pesado de rebaixar a frequência da antena para a banda base e entrega separados os canais I (sinal em fase) e Q (sinal em quadratura) para os conversores analógico-digitais fazerem a amostragem.

1.5. A matemática.



Para entender a matemática da coisa, imagine que o sinal que chega da antena é uma onda descrita pela equação cosseno de 2pi que multiplica a frequência da rádio frequência da antena no tempo ($RF = \cos(2\pi f_{RF} t)$), onde essa frequência pode ser, por exemplo, a portadora de uma rádio FM.

Ao mesmo tempo, o nosso oscilador local de hardware gera um sinal exatamente na mesma frequência, mas ele é dividido por um circuito defasador físico em duas vias independentes, separadas em exatos noventa graus. A via que chamamos de Em Fase, ou canal I, recebe o sinal do oscilador na forma de um cosseno, ou seja, a frequência do oscilador local é igual a ao cosseno de 2pi que multiplica a frequência do oscilador local no tempo ($LO_I = \cos(2\pi f_{LO} t)$). Já a via em Quadratura, o famoso canal Q, recebe o sinal defasado, que matematicamente equivale a um seno, ficando seno de 2pi que multiplica a frequência do oscilador local no tempo ($LO_Q = \sin(2\pi f_{LO} t)$), viu um é cosseno e outro é o seno.

1.6. O misturador na via I



O misturador de semicondutor atua como um multiplicador analógico puro, processando os sinais dessas duas vias de forma separada.

Veja que, o sinal de rádio frequência recebido pela antena é o produto do sinal de áudio m(t) com o sinal de RF da portadora, veja na imagem: ficando áudio m(t) que multiplica o sinal da portadora que é igual ao cosseno de (2pi) que multiplica a frequência da portadora de RF no tempo, mais a defasagem da onda ao chegar na antena, considerar essa defasagem é fundamental para recuperar o sinal na saída.

Na via em fase, esse sinal de RF é multiplicado com o sinal gerado pelo oscilador local, um sinal de cosseno puro, com a frequência cravada na mesma frequência da portadora, é a onda em fase. O misturador faz o produto desses dois cossenos usando a identidade trigonométrica que diz que o produto de dois cossenos de ângulos diferentes é igual a metade do cosseno da soma dos ângulos mais a metade do cosseno da diferença dos ângulos. O importante é que o resultado também é um cosseno, nesse nosso caso é igual a metade do sinal de áudio que multiplica um sinal igual ao cosseno de 4PI vezes a frequência da portadora, um sinal de alta frequência, 4 vezes a frequência da portadora. Agora a parcela mágica, mais a metade do sinal de áudio purinho com a defasagem do sinal de entrada. Essa parcela surgiu do fato que o cosseno da frequência da portadora menos a frequência do sinal do oscilador local é igual a zero, eles se cancelam, e o cosseno de zero é um, sobrando só o áudio purinho. Viu um sinal de RF mais o sinal de áudio puro. Para tirar só o sinal de áudio é muito fácil, é só passar esse sinal da saída por um filtro passa baixa, já que o sinal do RF tem uma frequência muito alta, depois do filtro sobra só o áudio. Esse é o milagre da via em fase.

1.7. O misturador na via Q



Na via em quadratura, a via Q, é exatamente o mesmo raciocínio, a diferença agora é que o sinal gerado no oscilador local vai ser do seno da frequência da portadora, e aqui é usada a identidade trigonométrica do produto de seno com cosseno, que gera só senos, esse é o pulo do gato.

Agora vamos obter na saída um sinal de RF de alta frequência e o sinal de áudio que multiplica o seno do ângulo de defasagem do sinal, em suma um sinal de áudio defasado de 90 graus do sinal em fase que era do tipo cosseno. Esse é o milagre que o misturador faz e tudo graças a boa e velha trigonometria mais a boa e velha eletrônica analógica.

1.8. Conclusão.



Toda aquela seletividade analógica que antigamente nos obrigava a passar horas na bancada girando delicadamente os núcleos de ferrite com uma chave de fenda de plástico para alinhar as FIs, agora é resolvida por algoritmos implacáveis, usando filtros matemáticos que não sofrem com calor, envelhecimento de capacitores ou umidade.

Mas, não se engane, o velho e incrivelmente robusto super-heteródino com suas bobinas físicas ainda é o coração pulsante de transmissores de alta potência, rádios de aviação e receptores clássicos de radioamadorismo de alto desempenho, onde a capacidade bruta de lidar com sinais gigantescos na antena sem saturar a entrada do rádio ainda vence a tecnologia digital. Contudo, para o gigantesco mercado de consumo atual e para os microcontroladores sem fio que povoam nosso laboratório, a engenharia contemporânea simplesmente trocou o cobre e o ferrite pela precisão fria da matemática processada em silício. Diga aí nos comentários se você conhecia a conversão direta dos rádios digitais?