

BANDAS LATERAIS, HARMÔNICOS, ETC

Por Luiz Amaral
PY1LL/PY4LC

Introdução

Você já parou para pensar sobre o que são realmente as bandas laterais da modulação e os harmônicos? Você compreendeu essa conceituação *de verdade*?

Vamos recordar alguns conceitos básicos importantes.

Em primeiro lugar consideremos aqui somente circuitos independentes do tempo, isto é, cujos parâmetros são constantes (os componentes não variam no tempo).

Um circuito linear é incapaz de produzir, em sua saída, sinais que contenham frequências diferentes daquelas em sua entrada. Isto é fácil de compreender: se um circuito é linear, a sua saída é (por definição) *proporcional* à sua entrada, ou seja, se uma entrada for senoidal de certa frequência, por ser proporcional, sua saída também o será¹.

Um circuito modulador de AM, por exemplo, recebe em suas entradas o sinal modulador de frequência ω e a portadora a ser modulada de frequência Ω . Mas, têm na sua saída, além de, eventualmente, as próprias frequências da entrada, outras frequências novas, como as dos harmônicos (múltiplos) de ω e de Ω e outras como $\Omega - \omega$ e $\Omega + \omega$, que são as chamadas bandas laterais.

Um circuito multiplicador de frequência (dobrador, triplicador, etc) tem em sua entrada uma frequência e na saída um seu múltiplo.

Dessa forma, tanto o circuito modulador como o multiplicador, possuem em suas saídas frequências *diferentes* das de suas entradas e, portanto, **não podem ser circuitos lineares**².

Este é um conceito fundamental.

Outro conceito importante é que todo sinal periódico não senoidal é composto de soma de senoides de frequências múltiplas da frequência ω chamada de fundamental (correspondente ao período do sinal periódico), conforme o exemplo da Figura 1. No caso desta figura, uma senoide de frequência f é somada com uma senoide de frequência $3f$ e de amplitude $1/3$ da primeira. Em azul aparece (aproximadamente) um 'sketch' da soma das duas senoides. Note-se que a figura começa a formar uma onda quadrada. Se somarmos uma senoide de frequência $5f$ e de amplitude $1/5$ da primeira, vai-se detalhando melhor a onda quadrada. Se usarmos todos os harmônicos ímpares de ordem desde 1 até n , a onda quadrada fica perfeita. Pode-se dizer que uma onda quadrada contém energias em todos os harmônicos ímpares. Isto significa que, se passarmos a onda quadrada por filtros nas frequências harmônicas ímpares da sua fundamental, todos os filtros produzirão saídas nessas frequências harmônicas, mas se excitarmos os filtros com a senoide fundamental, nenhum filtro harmônico (para $n \neq 1$, que é a própria fundamental) produzirá saída.



Figura 1

¹ Pode haver apenas a introdução de uma fase que depende geralmente da frequência, mas que não a altera.

² Na verdade ambos devem ser, idealmente, se independentes do tempo, circuitos quadráticos, ou sejam, do segundo grau.

Por Luiz Amaral
PY1LL/PY4LC

Um sinal (função do tempo) periódico pode ser observado com o osciloscópio, onde é vista a sua forma de onda no chamado domínio do tempo. Mas o mesmo sinal pode ser observado de modo diferente, por um analisador de espectro, onde se observam as diversas componentes senoidais que o compõem, sendo chamado de domínio de frequência. As duas formas são perfeitamente equivalentes e descrevem o mesmo sinal.

A Geração de Novas Frequências

Um sinal de frequência única Ω é uma senoide pura (a fase não importa). Quando modulamos em AM essa senoide, a forma do sinal no tempo deixa de ser senoidal³. Isto significa que outras frequências foram criadas pelo processo modulador. Matematicamente se demonstra que foram criadas justamente as novas frequências $\Omega-\omega$ e $\Omega+\omega$, onde ω são as diversas frequências componentes do sinal modulador (não necessariamente senoidal). São as chamadas *bandas laterais*.

Note-se que, no domínio do tempo, não se observam as bandas laterais e, no domínio de frequência, não se observa a forma do sinal variando no tempo (modulado). No domínio de frequência, não se podendo ver variações de amplitude, a amplitude da portadora é constante. No domínio do tempo, apenas a composição temporal de senoides de amplitude constante gera um sinal não senoidal e, portanto, de amplitude variável. É fundamental que se tenha em mente que, devido à perfeita equivalência dos dois domínios, as bandas laterais não são **devidas** à modulação, mas são a **própria** modulação, apenas observada em outro domínio (de frequência).

Dessa forma, quando se diz que um sinal modulado em AM⁴ contém bandas laterais, significa que o estamos caracterizando através do domínio de frequência. Caracterizado no domínio do tempo só se pode falar em variação de sua amplitude.

O processo de multiplicação de frequência é *idêntico* ao da modulação em AM. No dobrador, por exemplo, modulamos uma senoide de frequência Ω por um outro também de frequência Ω . As bandas laterais são $\Omega+\Omega$, que resulta em $2\times\Omega$ (frequência dobro) e $\Omega-\Omega$ que resulta em 0 (DC). Para o triplicador, o sinal modulador seria $2\times\Omega$ ⁵ e assim por diante⁶.

Será que você entendeu isso de modo suficientemente profundo? Sim? Então responda à seguinte questão: um transmissor está gerando uma única frequência da portadora não modulada, portanto uma senoide pura. Um receptor em visada direta (para se esquecer problemas de variação da propagação) está recebendo, assim, um sinal constante. Mas suponha que a antena de transmissão seja direcional giratória (por hipótese ela pode girar livremente sem problemas com os cabos) e que esteja girando a 1000 voltas por segundo (por hipótese, apenas!). O transmissor continua gerando uma pura senoide, mas no receptor o sinal está variando de amplitude 1000 vezes por segundo. Pergunta-se: no receptor observam-se bandas laterais de 1000 Hz? Caso positivo, quem as gerou e de onde vem a energia que está contida nas bandas laterais?

A resposta é sim, o receptor 'vê' um sinal modulado, portanto, observando-se pelo domínio de frequências, nota-se a presença de bandas laterais, com a amplitude da portadora menor que no caso estático. A energia das bandas laterais vem justamente da diminuição da amplitude da portadora, ou seja, é retirada desta. O transmissor não vê nenhuma banda lateral, mas o receptor sim.

Claro que surge uma pergunta: mas o modulador aqui é, obviamente, a antena rotativa que é um elemento linear. Como ocorreu a modulação então? Boa pergunta!

A resposta está no início da **Introdução**, onde dissemos que consideraríamos apenas circuitos independentes do tempo. A antena aqui tem um parâmetro dependente do tempo que é o ganho na direção do receptor. Essa dependência do tempo dos circuitos, mesmo lineares, pode levar à criação de frequências novas também⁷.

³ Um sinal é senoidal puro se sua amplitude for constante ao longo do tempo, desde $-\infty$ até $+\infty$. Qualquer desvio dessa forma estacionária significa que o sinal NÃO é mais senoidal puro.

⁴ Qualquer tipo de modulação faz com que o sinal não seja mais senoidal, não somente a AM, mas estamos apenas tratando desse caso mais evidente.

⁵ O sinal $2\times\Omega$ seria o resultado da geração não linear, interna ao multiplicador, do dobro da frequência.

⁶ Normalmente, devido a não se controlar perfeitamente o grau da não linearidade, os multiplicadores geram frequências indesejáveis que são eliminadas por filtros ressonantes.

⁷ Existem circuitos misturadores/moduladores que funcionam justamente por variação paramétrica.

Quando a frequência de modulação é da ordem de grandeza da portadora e senoidal, o fenômeno da modulação de AM é usado para conversão de frequências (que ocorre no estágio conversor de transmissores e receptores), mas o processo é exatamente o mesmo da modulação de AM convencional.

Quando a modulação não é em AM, e sim, por exemplo, em frequência (FM), a amplitude do sinal modulado permanece constante no tempo (domínio do tempo), mas a forma não sendo mais senoidal, também é o resultado da criação de bandas laterais⁸ e geralmente é gerada por modulação paramétrica (dependência do tempo) e não por modulação não linear.

Conclusão

O presente artigo apenas tenta apresentar a conceituação correta sobre o assunto exposto que é, muitas vezes, mal compreendido por muitos. Foi tentada uma apresentação mais ou menos profunda e abrangente, mas de modo acessível ao técnico ou radioamador comum.

Em especial é chamada a atenção para a equivalência total entre a modulação de AM, a multiplicação e a conversão de frequências. Além disso, é chamada a atenção para o fato de que circuitos 'bem comportados', isto é, lineares e independentes do tempo, não podem ser usados como moduladores e multiplicadores ou conversores de frequências. É também apresentada a conceituação dos domínios do tempo e de frequência, reforçando-se a visão de que, olhar um sinal modulado num osciloscópio, fornece a mesma informação sobre ele que olhá-lo num analisador de espectro, sendo observações equivalentes, cada uma com sua visão de domínio.

**Por Luiz Amaral
PY1LL/PY4LC**

⁸ Aqui as bandas não são simplesmente da forma $\Omega+\omega$ e $\Omega-\omega$, mas muito mais complicada, dependendo de funções matemáticas bastante transcendentais.