

2005年度秋期実用マイクロ波講座

無線機設計におけるRF技術のすべて

2005年 9月～12月

松下電器産業(株) 上野 伴希(工学博士)

研修アジェンダ

1. システム設計概要
2. 低雑音アンプ(LNA)その1
3. 低雑音アンプ(LNA)その2
4. ミクサ
5. ローカル発振器
6. 変復調その1
7. 変復調その2
8. パワーアンプ(PA)
9. その他の回路
10. ダイレクトコンバージョンRX / TX

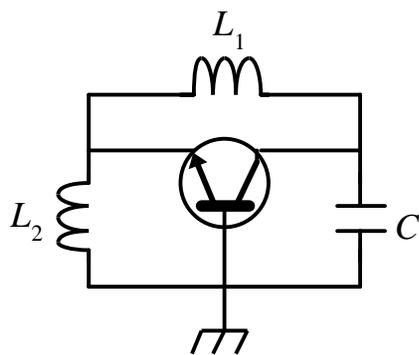
5. ローカル発振器

2005年 10月12日(水)

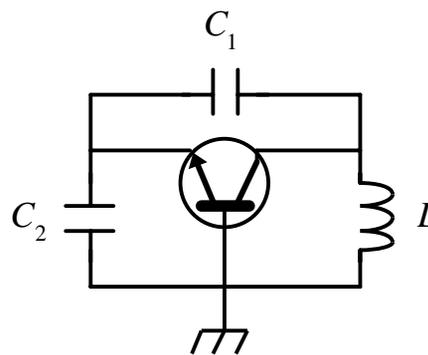
1. 発振回路の基礎
2. VCO
3. OSCフェーズノイズ
4. フェーズノイズ測定
5. PLL動作原理
6. スワローカウンタ
7. 位相比較器
8. PLLのフェーズノイズ
9. 分数分周シンセサイザ

発振回路の基礎

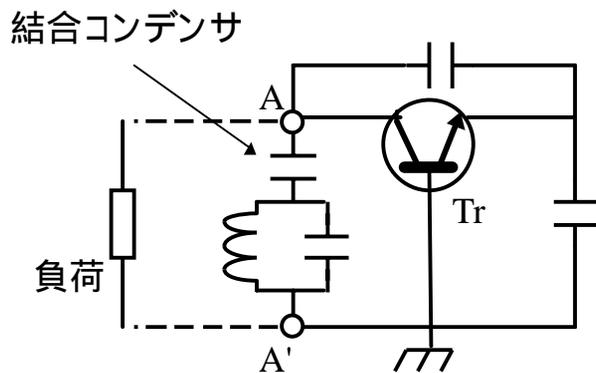
LC発振回路



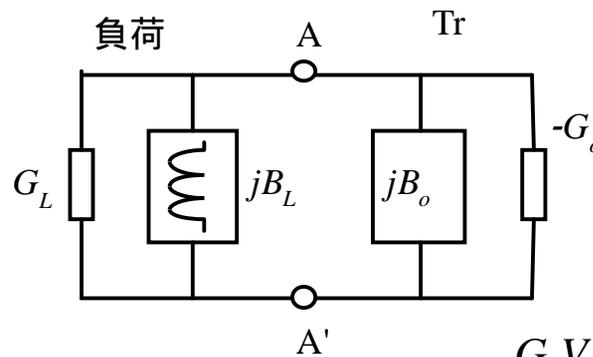
ハートレー回路



コルピッツ回路



クラップ回路

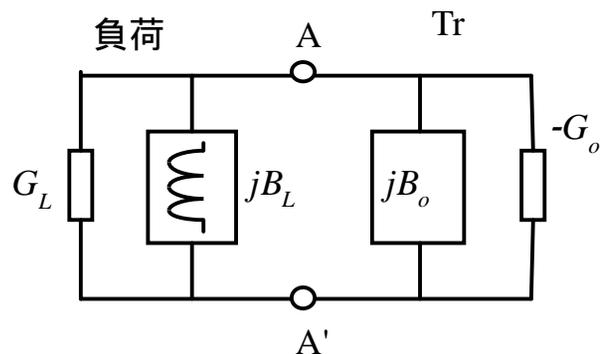


負性抵抗2端子モデル

$$G_o V^2 \geq G_L V^2$$

発振回路の基礎

負性抵抗のモデル



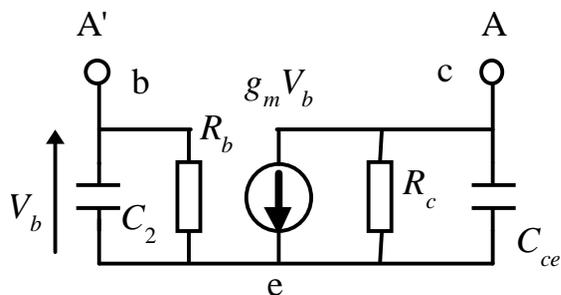
発振の

$$G_o = G_L$$

振幅条件

$$B_o + B_L = 0$$

周波数条件



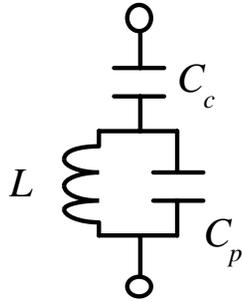
ハイブリッド 形等価回路

$$Y_{cb} \approx -\frac{g_m C_s}{C_{ce} + C_2} + j\omega C_s$$

$$C_s = \frac{C_{ce} C_2}{C_{ce} + C_2} \quad \omega C_{ce}, \omega C_2 \gg g_m, \frac{1}{R_b}, \frac{1}{R_c}$$

発振回路の基礎

共振回路と発振周波数

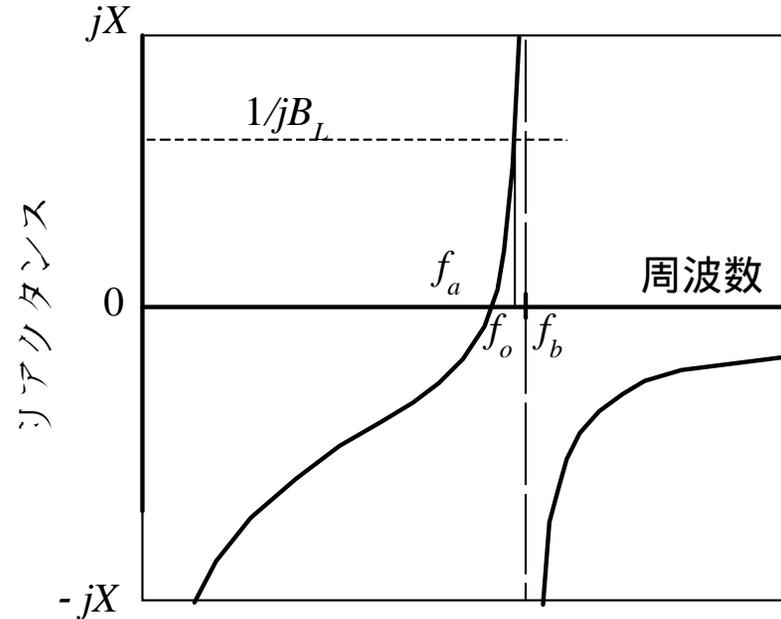


直並列共振回路

$$f_a = \frac{1}{2\pi\sqrt{L(C_p + C_c)}}$$

$$f_b = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_p}}$$

$$\Delta f \approx \frac{1}{2} \frac{C_c}{C_p} f_b$$

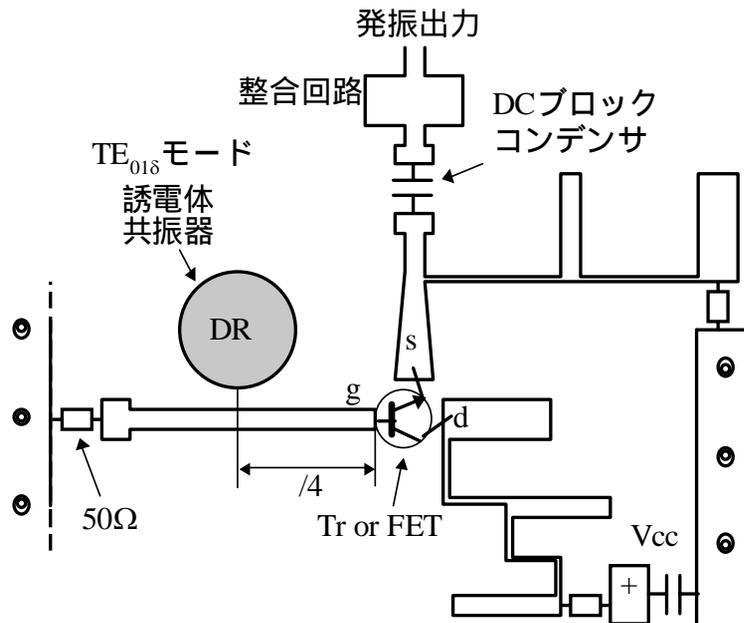


インピーダンス特性

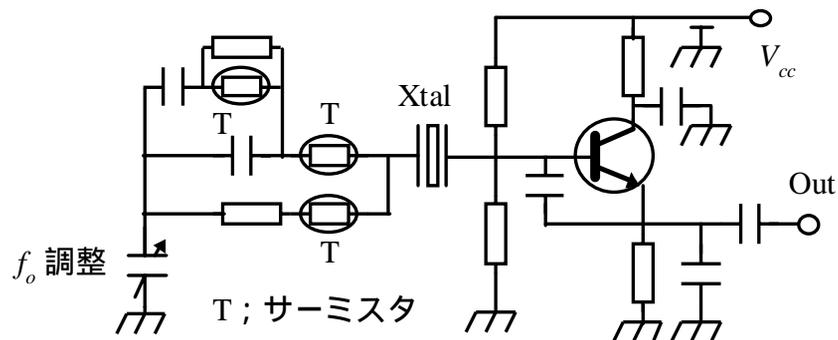
発振回路の基礎

高安定発振回路

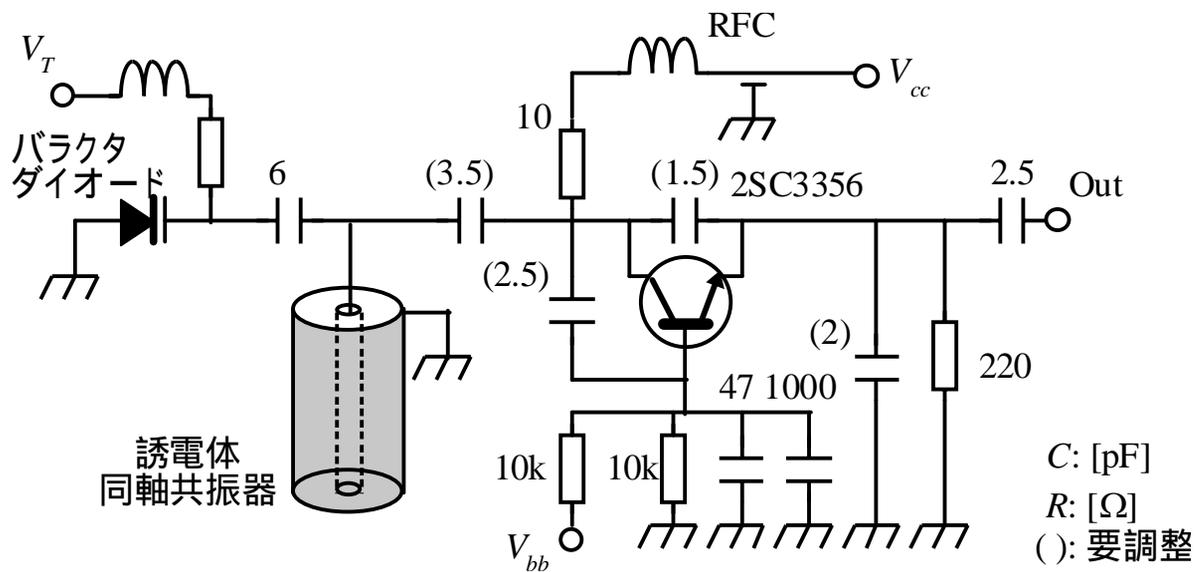
高Q誘電体共振器OSC



水晶発振回路

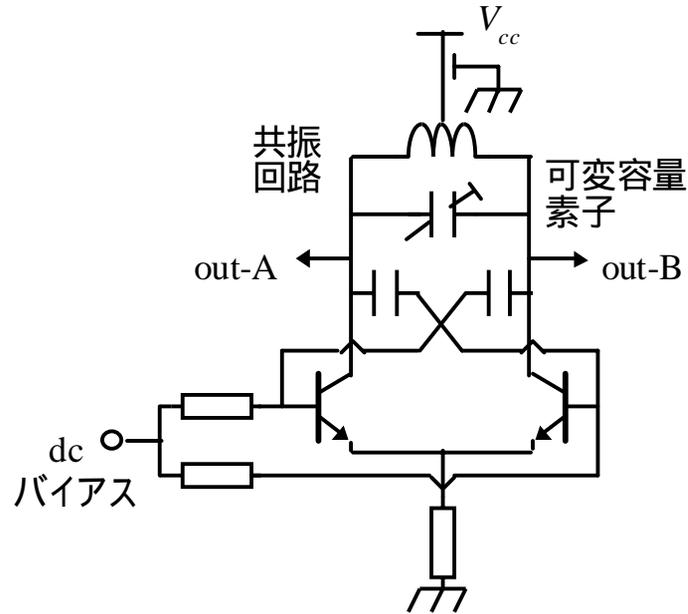


携帯電話用回路(ディスクリートTr)



900MHz帯VCO回路例

携帯電話用回路(RF-IC)



正帰還形差動発振回路

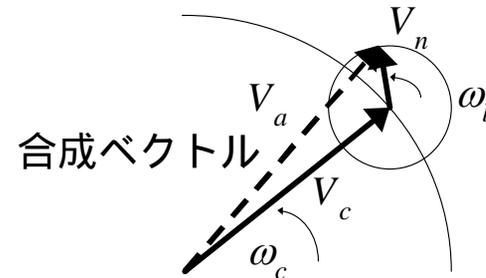
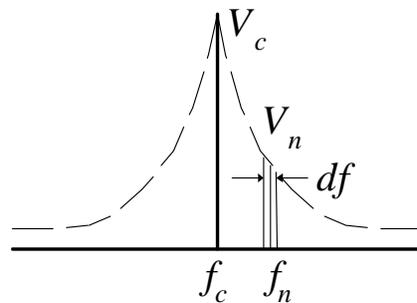
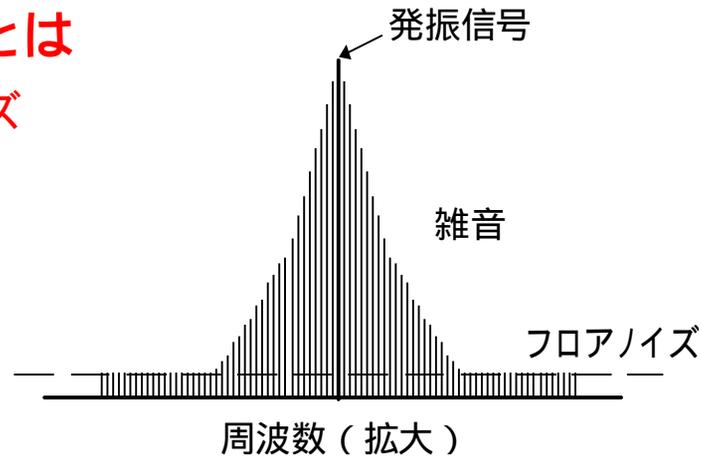
変形Armstrong発振回路

OSCフェーズノイズ

発振器フェーズノイズとは

フェーズノイズ = FMノイズ

ノイズ = [W/Hz]



交流表現

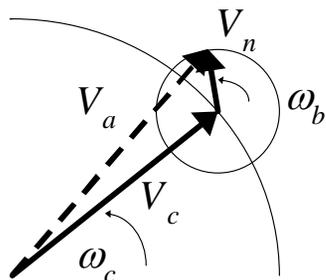
$$V = Ae^{j\omega t}$$

$$V_a = V_c (1 + m_b \cos \omega_b t) e^{j(\omega_c t + h \sin \omega_b t)}$$

$$m_b = \frac{V_n}{V_c} \quad h = \tan^{-1} \frac{V_n}{V_c}$$

OSCフェーズノイズ

フェーズノイズ = FMノイズ



$$V_a = V_c (1 + m_b \cos \omega_b t) e^{j(\omega_c t + h \sin \omega_b t)}$$

$$m_b = \frac{V_n}{V_c} \quad h = \tan^{-1} \frac{V_n}{V_c}$$

$$V_a = V_c e^{j\omega_c t} + V_n e^{j\omega_n t} = V_c e^{j\omega_c t} \left(1 + \frac{V_n}{V_c} e^{j(\omega_n - \omega_c)t} \right)$$

$$= V_c (1 + m_b e^{j\omega_b t}) e^{j\omega_c t}$$

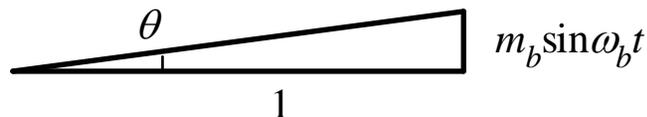
$$= V_c (1 + m_b \cos \omega_b t + jm_b \sin \omega_b t) e^{j\omega_c t}$$

$$= V_c (1 + m_b \cos \omega_b t) \left(1 + \frac{jm_b \sin \omega_b t}{1 + m_b \cos \omega_b t} \right) e^{j\omega_c t}$$

$$1 \gg m_b \quad 1 + m_b \cos \omega_b t \approx 1$$

$$\approx V_c (1 + m_b \cos \omega_b t) e^{j\theta} e^{j\omega_c t}$$

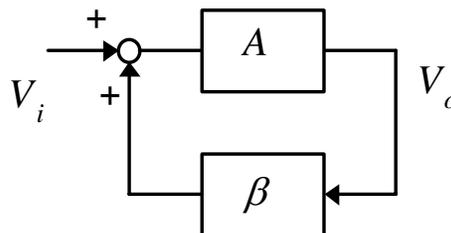
$$\theta = \tan^{-1}(m_b \sin \omega_b t) \approx (m_b \sin \omega_b t)$$



OSCフェーズノイズ

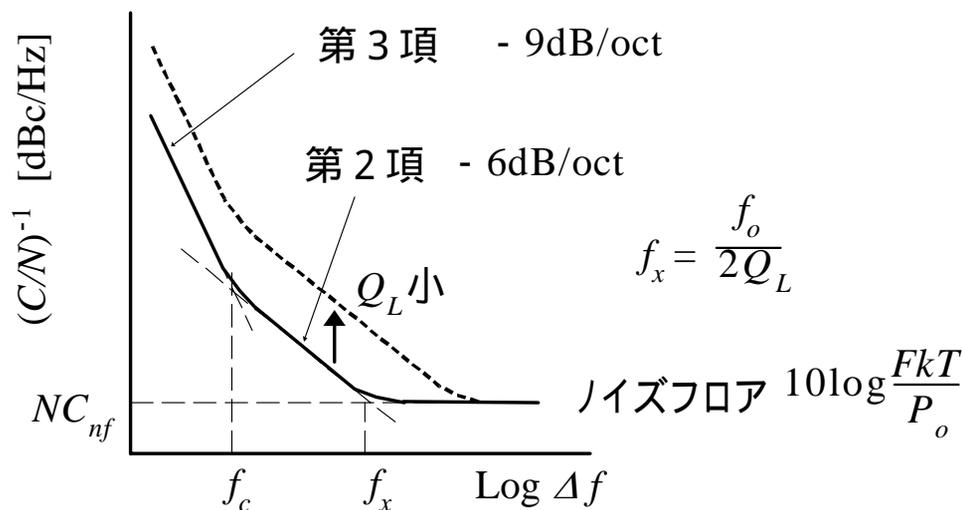
自由発振フェーズノイズ

Leesonの解析



$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{A}{1 - \beta A}$$

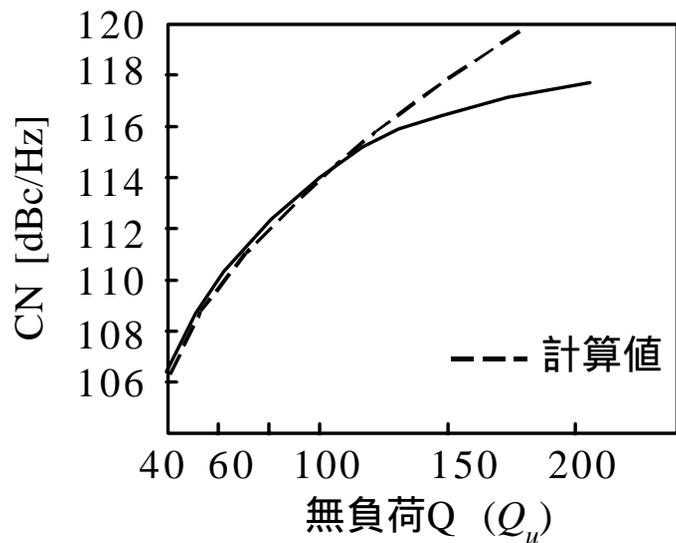
$$(C/N)^{-1} \approx 10 \log \left[1 + \frac{1}{\Delta f^2} \left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 + \frac{f_c}{\Delta f^3} \left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 \right] + NC_{nf}$$



OSCフェーズノイズ

Q_L とC/Nの関係

$$(C/N)^{-1} \approx 10 \log \left[1 + \frac{1}{\Delta f^2} \left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 + \frac{f_c}{\Delta f^3} \left(\frac{f_0}{2Q_L} \right)^2 \right] + NC_{nf}$$

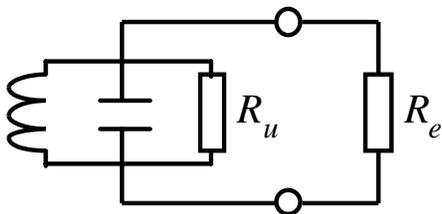


f_{osc} : 930MHz

@12.5kHz
off-carrier

$V_{ce} = 3V$

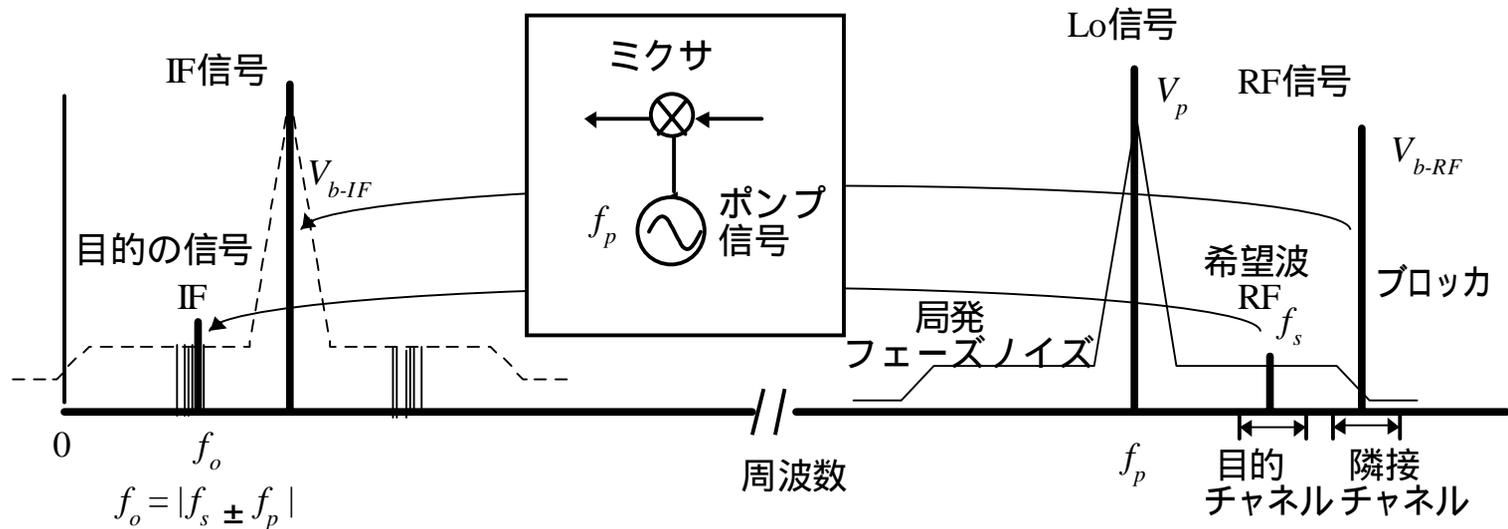
$I_c = 7mA$



$$\frac{1}{Q_L} = \frac{1}{Q_u} + \frac{1}{Q_e}$$

OSCフェーズノイズ

ブロッカによる感度劣化

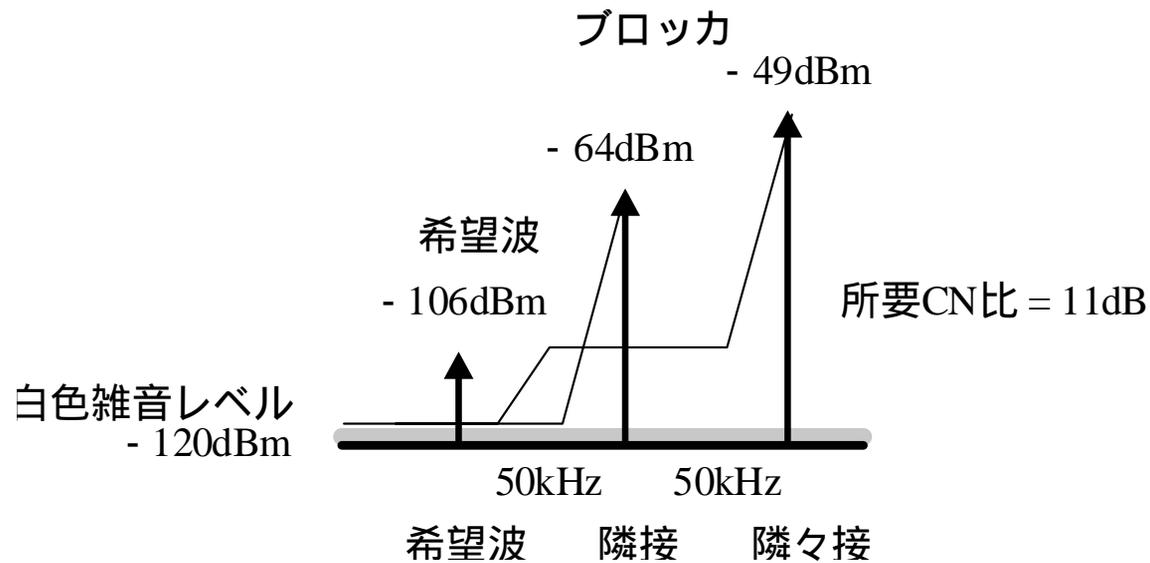


問題 ミクサでのフェーズノイズの転写を確かめなさい

$$V_{b-IF} = V_{b-RF} \times V_p$$

ミキサによるフェーズノイズに関する問題

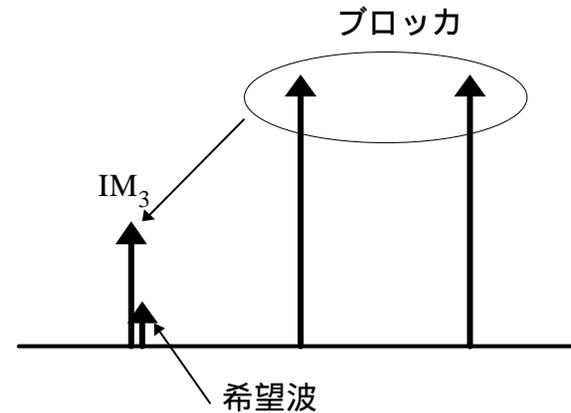
図に示すブロッカのテストシナリオにおける受信機局発のフェーズノイズの仕様を求めよ



3次歪みブロッカによる妨害のReview

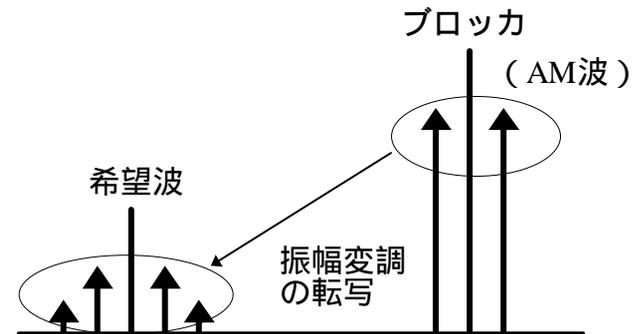
近傍に存在するブロッカ (Blocker: 強力妨害波) 排除能力

IM (Inter-modulation) 歪み:



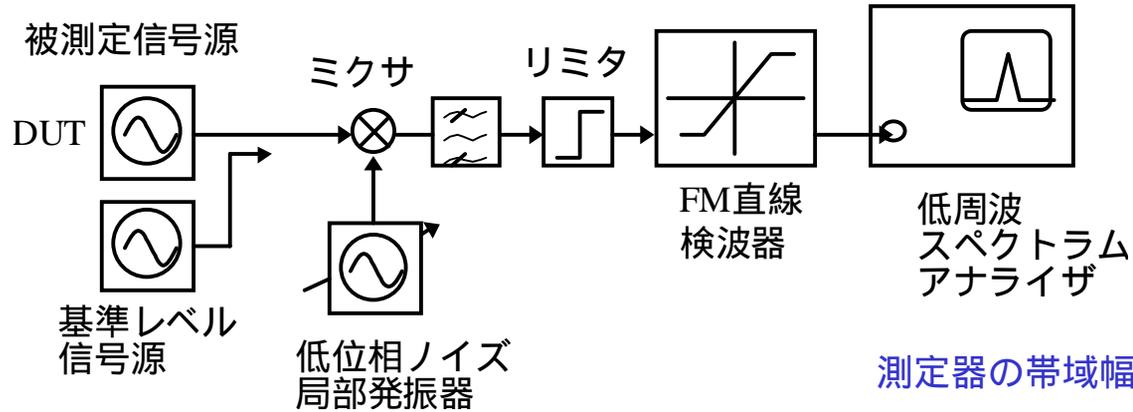
CM (Cross-modulation) 歪み:

AMを持つ信号: QPSK
QAM

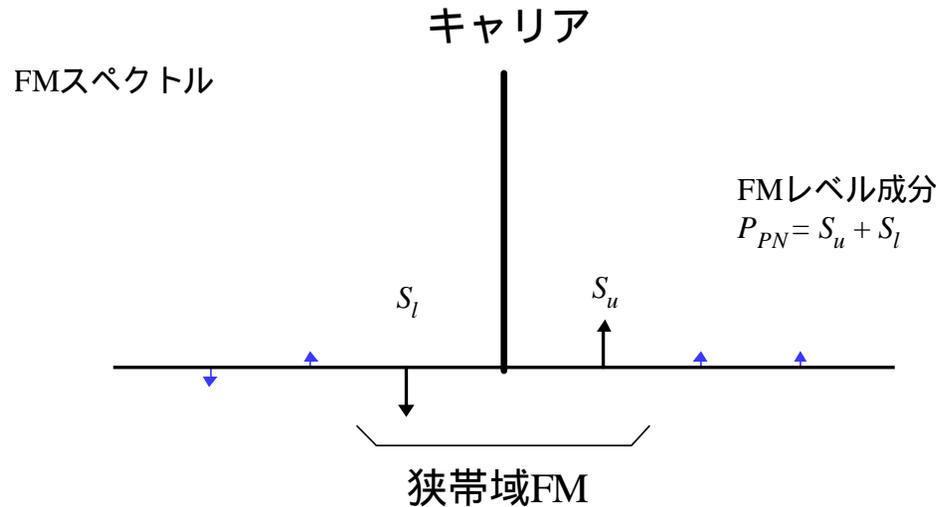


フェーズノイズ測定

FM直線検波器による測定



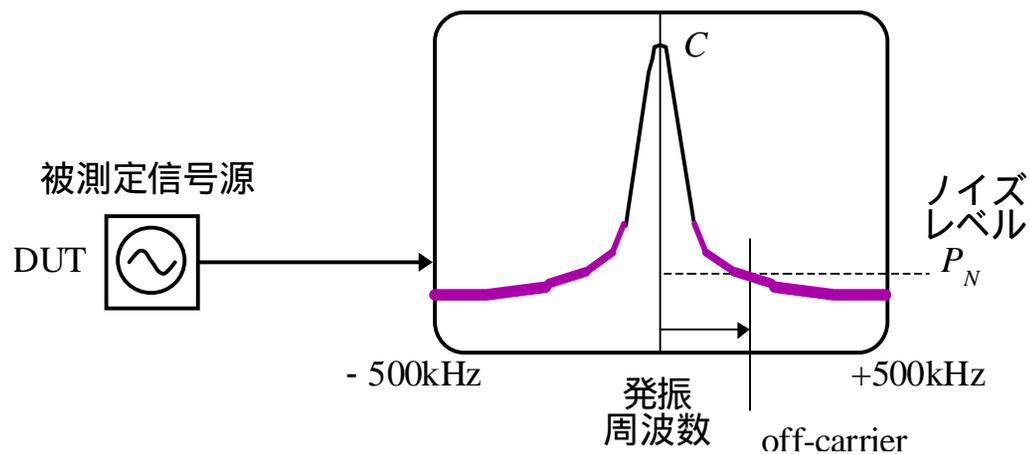
測定セットアップ



フェーズノイズ測定

スペクトラムアナライザによる測定

スペクトラムアナライザディスプレイ



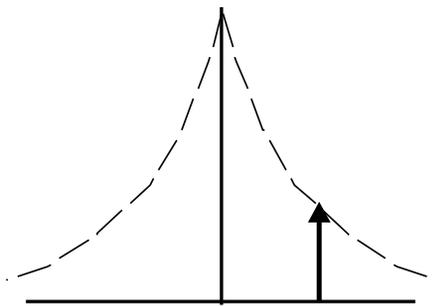
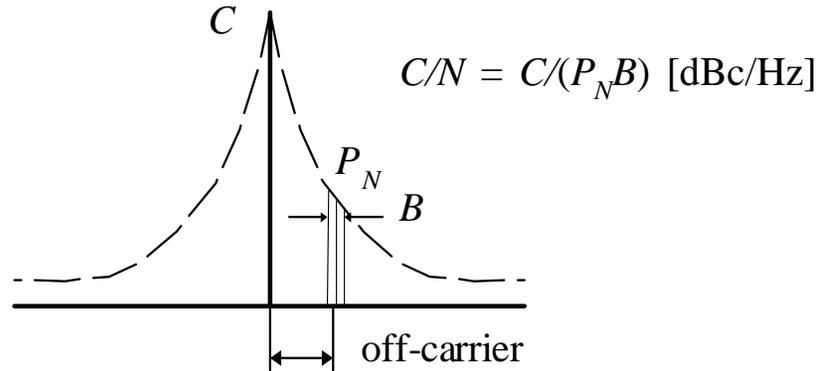
測定器の帯域幅 = ノイズ帯域 B

P_N がフェーズノイズのレベル

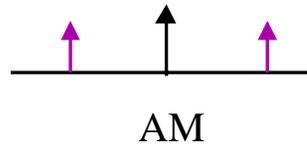
フェーズノイズ測定

スペクトルの分解1

スペクトラムアナライザ波形

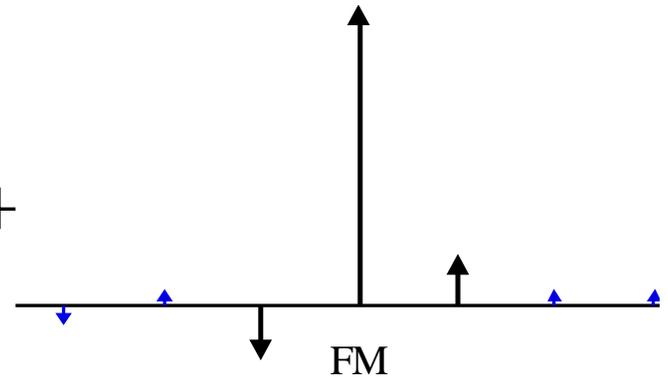


=

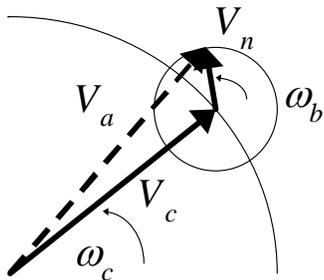


AM

+



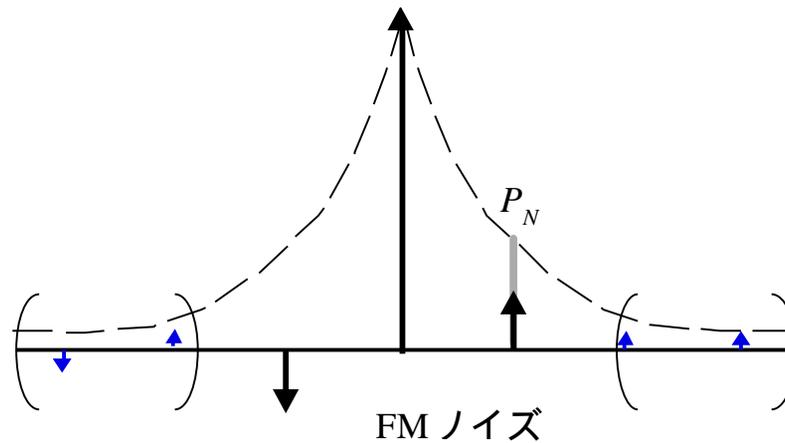
FM



$$v = \cos \omega_c t + \frac{m}{2} \cos(\omega_c + \omega_b)t + \frac{m}{2} \cos(\omega_c - \omega_b)t$$

$$v = J_0(\beta) \cos \omega_c t + \sum_{n=1}^{\infty} J_n(\beta) \{ \cos(\omega_c + n\omega_b)t + (-1)^n \cos(\omega_c - n\omega_b)t \}$$

スペクトルの分解2

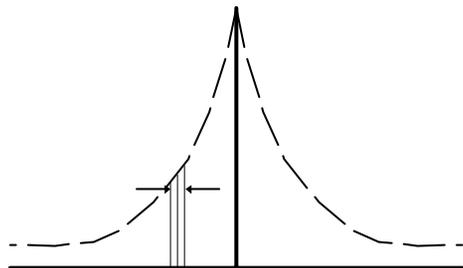


振幅1/2

電力1/4

$$\frac{1}{4} + \frac{1}{4} = \frac{1}{2} \quad (P_N \text{より} - 3\text{dB})$$

$$(-6\text{dB}) + (-6\text{dB}) = -3\text{dB}$$



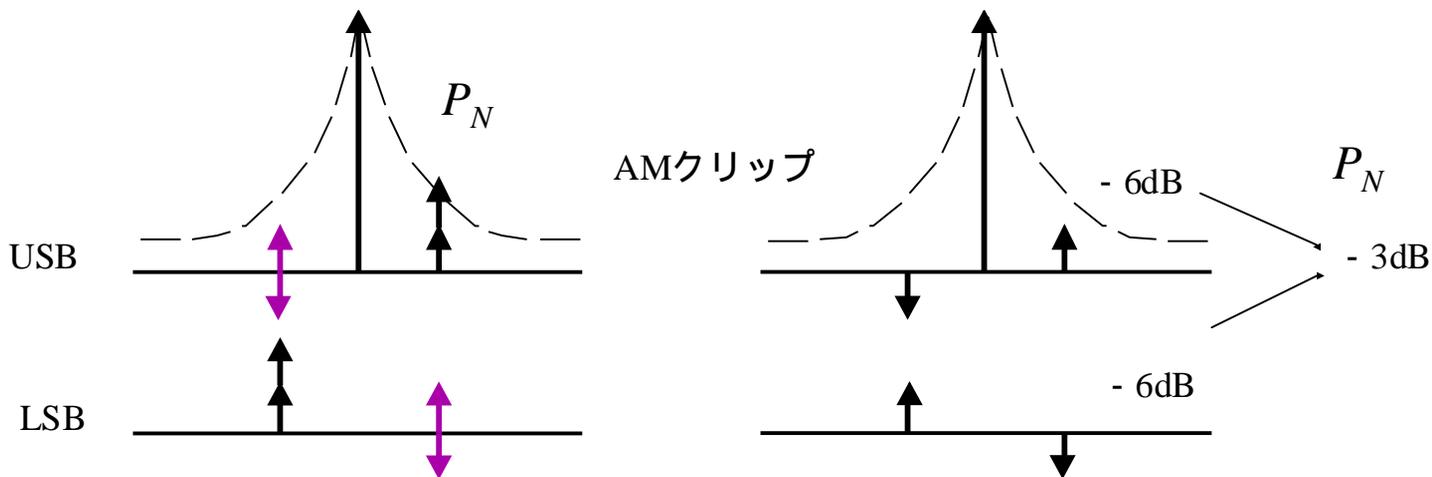
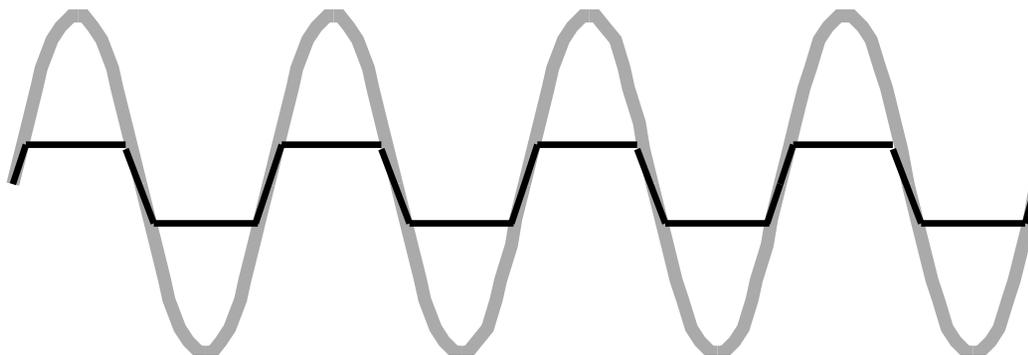
フェーズノイズの定義 = 両サイドバンド

$$(-3\text{dB}) + (-3\text{dB}) = P_N$$

USBとLSBのノイズは相関性がない

フェーズノイズの測定

リミタの作用



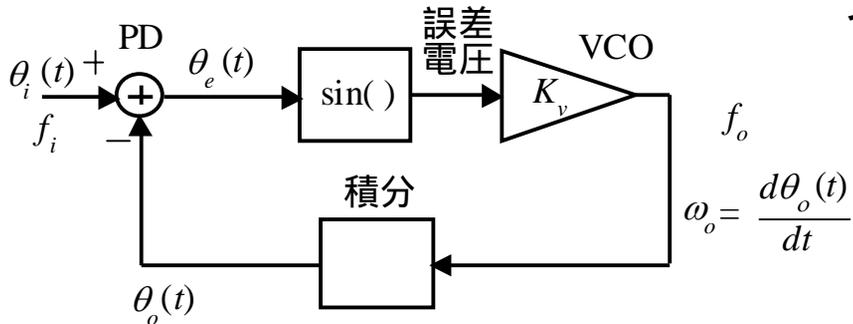
P_N : スペクトラムアナライザで測定される値

総合ノイズ (EVM/Error Vector magnitude) とフェーズノイズ システムに重要なのはどちらのノイズ？

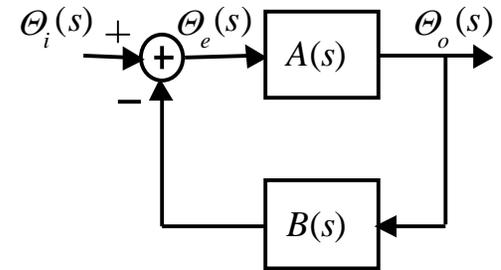
1. スペクトラムアナライザで測るのはその周波数の総合ノイズ
2. フェーズノイズメータはフェーズノイズを測定
発振信号両サイドバンドのフェーズノイズ(リミタでAMノイズを排除)
3. GSM送信の帯域外ノイズ仕様は総合ノイズで規定
4. フェーズノイズ特性で総合ノイズを評価するとき特性の翻訳に注意

PLL動作原理

フィードバック回路



ラプラス変換

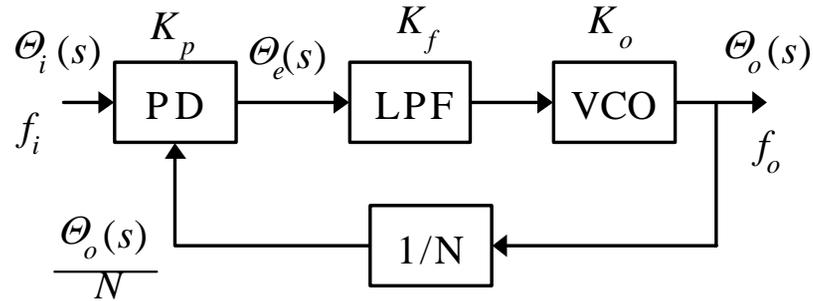


周波数フィードバック制御

ラプラス変換 $F(s) = L(f) = \int_0^{\infty} e^{-st} f(t) dt$

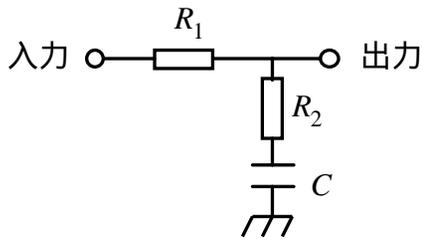
$$\Theta_o = \frac{A(s)}{1 + A(s)B(s)} \Theta_i$$

自動制御の解析

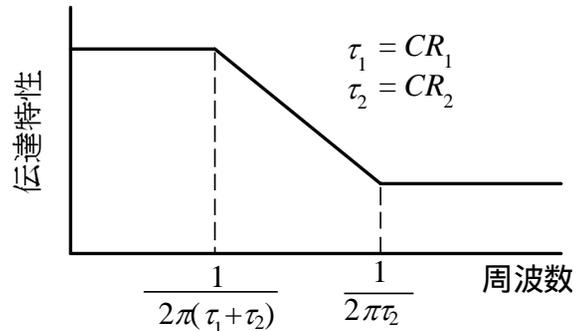


$$f_o = N \cdot f_i$$

ブロック図



ループフィルタ



$$F(s) = \frac{\tau_2 s + 1}{(\tau_1 + \tau_2)s + 1}$$

伝達関数について

$$H(s) = \frac{A(s)}{1 + A(s)B(s)} = N \frac{\omega_n(2\zeta - \omega_n/K)s + \omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2}$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K}{\tau_1 + \tau_2}}$$

固有周波数

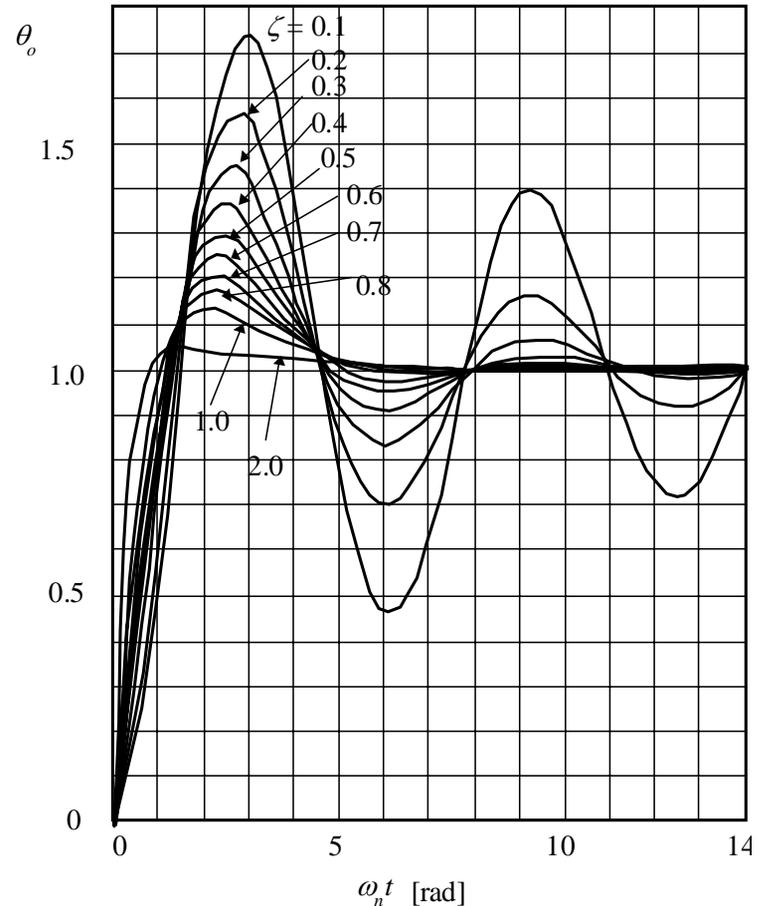
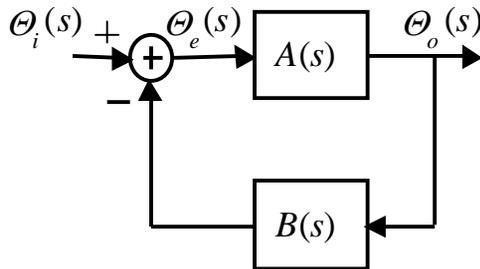
$$\zeta = \frac{\omega_n}{2} \left(\tau_2 + \frac{1}{K} \right)$$

ダンピングファクタ

K : ループゲイン

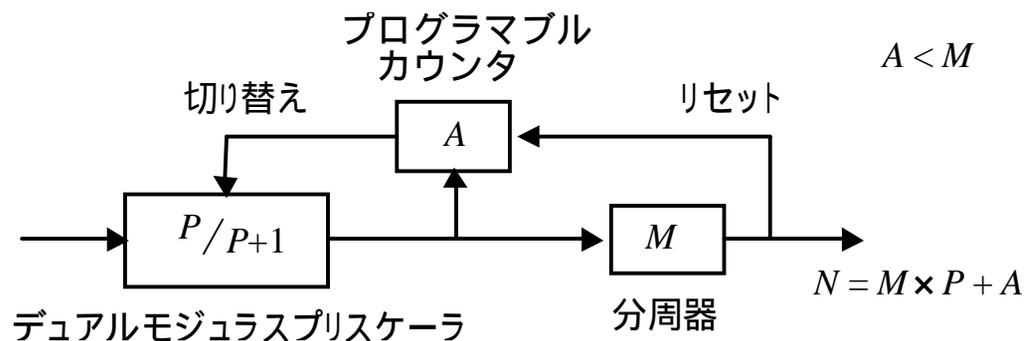
ステップ関数

$$L(u(t)) = \frac{1}{s}$$



スワローカウンタ

分周動作の様子



最初($P+1$)で分周

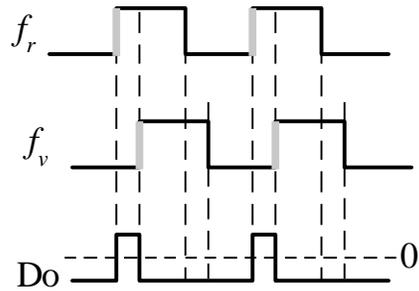
$$N = (P + 1)A + P(M - A) = PM + A$$

64/65分周: A (6ビットのプログラマブルカウンタ)

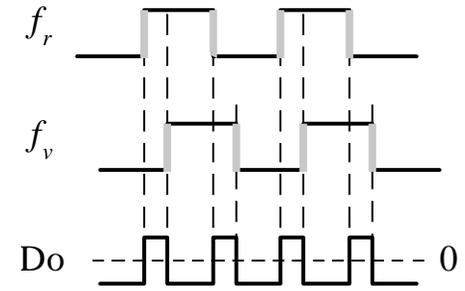
A を下位ビット, M を上位ビットする N カウンタができる

位相比較器

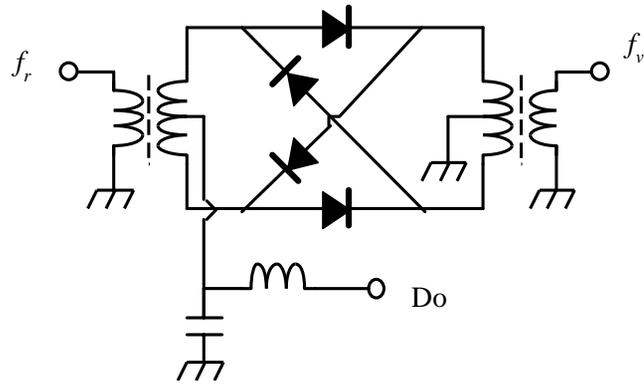
デジタル方式



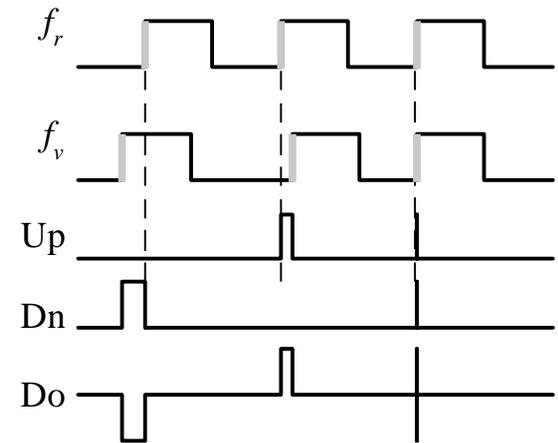
RS - flipflop



Exclusive - OR



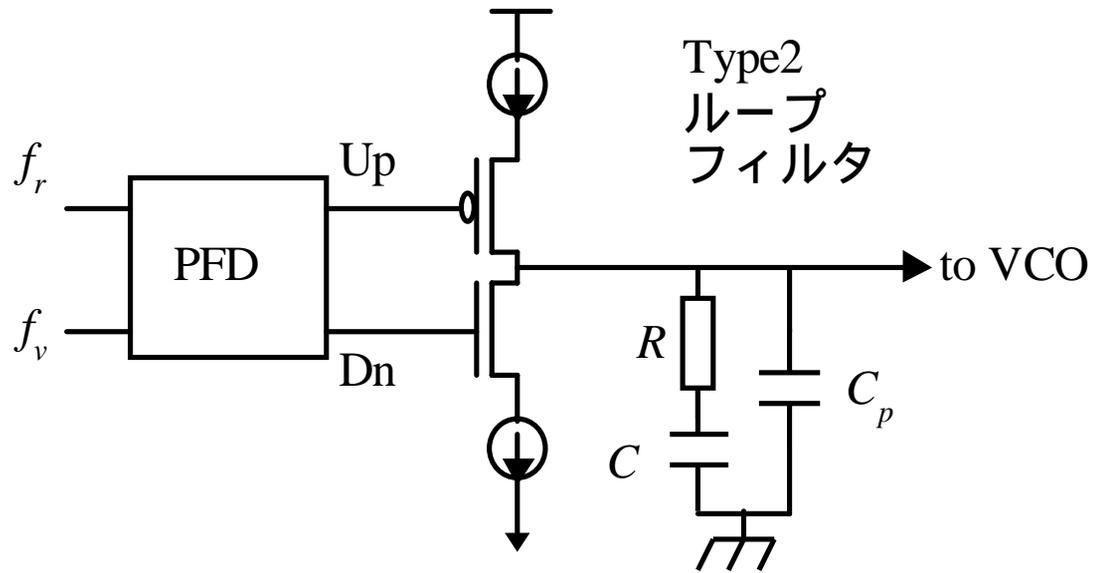
アナログ比較器 (DBM)



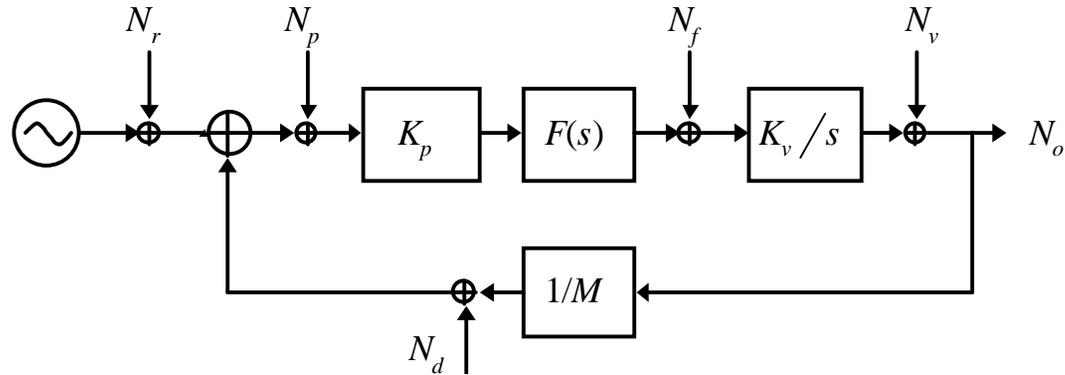
Positive-edge trigger tri-states

位相比較器

チャージポンプ

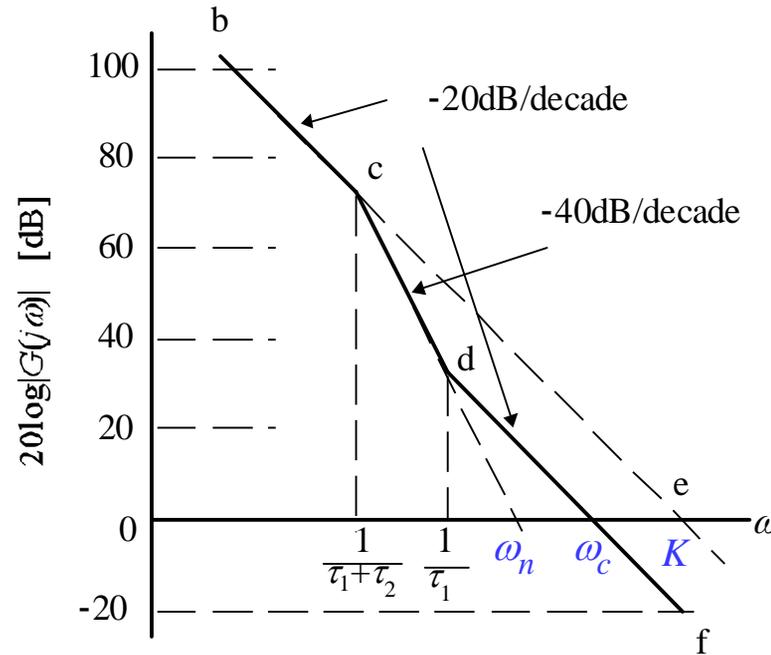


雑音発生解析



$$N_o = M^2(N_r + N_p + N_d) \left| \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} \right|^2 + \left(N_v + \frac{K_v^2}{\omega^2} N_f \right) \left| \frac{1}{1+G(j\omega)} \right|^2$$

オープンループゲイン



$$G(j\omega) = \frac{K_v K_p}{M} \frac{F(j\omega)}{j\omega}$$

$G(j\omega)$: 開ループゲイン

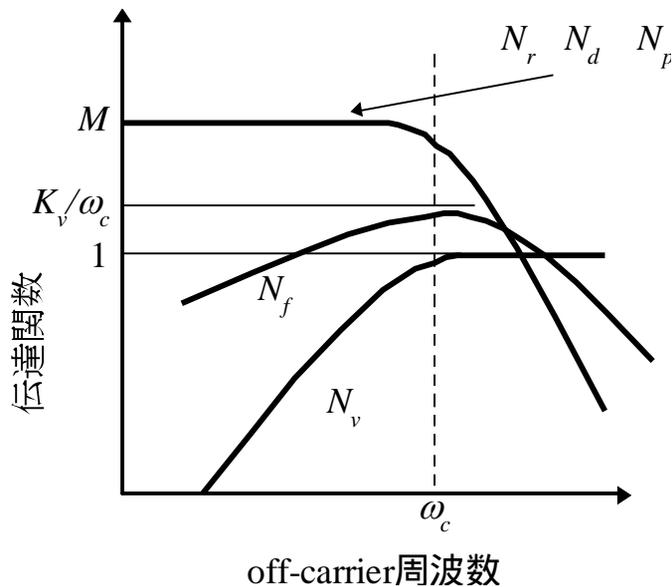
$F(j\omega)$: ループフィルタ伝達関数

PLLのフェーズノイズ

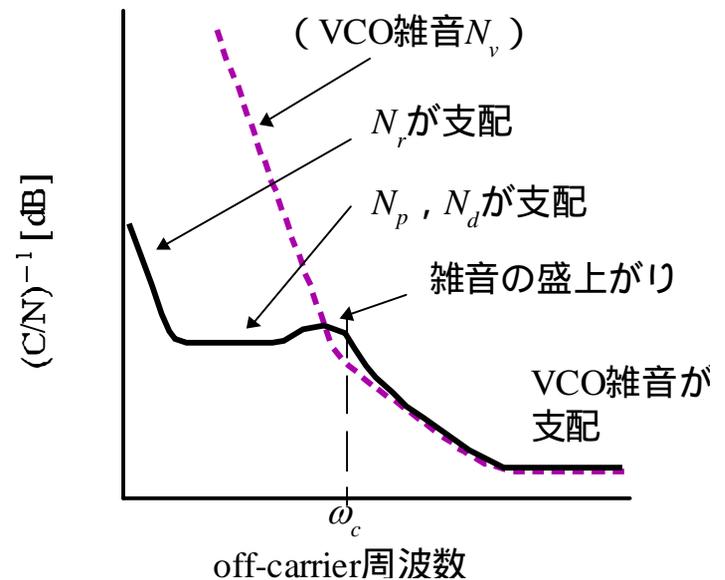
伝達関数とフェーズノイズ特性

$$N_o = M^2(N_r + N_p + N_d) \left| \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} \right|^2 + \left(N_v + \frac{K_v^2}{\omega^2} N_f \right) \left| \frac{1}{1+G(j\omega)} \right|^2$$

伝達特性



雑音特性



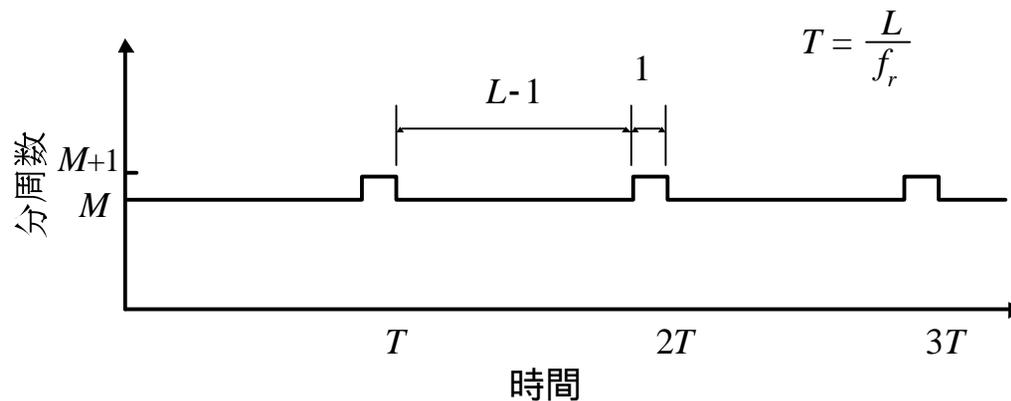
分数分周シンセサイザ

原理

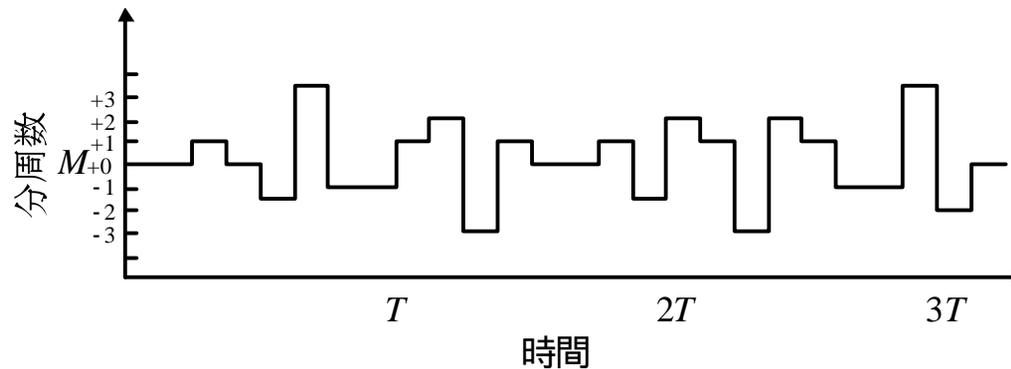
整数分周 $f_o = Nf_r$

分数分周 $f_o = \left(M + \frac{K}{L} \right) f_r$ $M, K, L (K < L)$: 整数

平均的分数



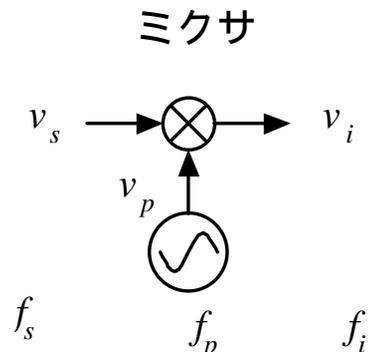
分周数を拡散



For Instructor

OSCフェーズノイズ

解答:ミキサでのフェーズノイズの転写を確かめなさい



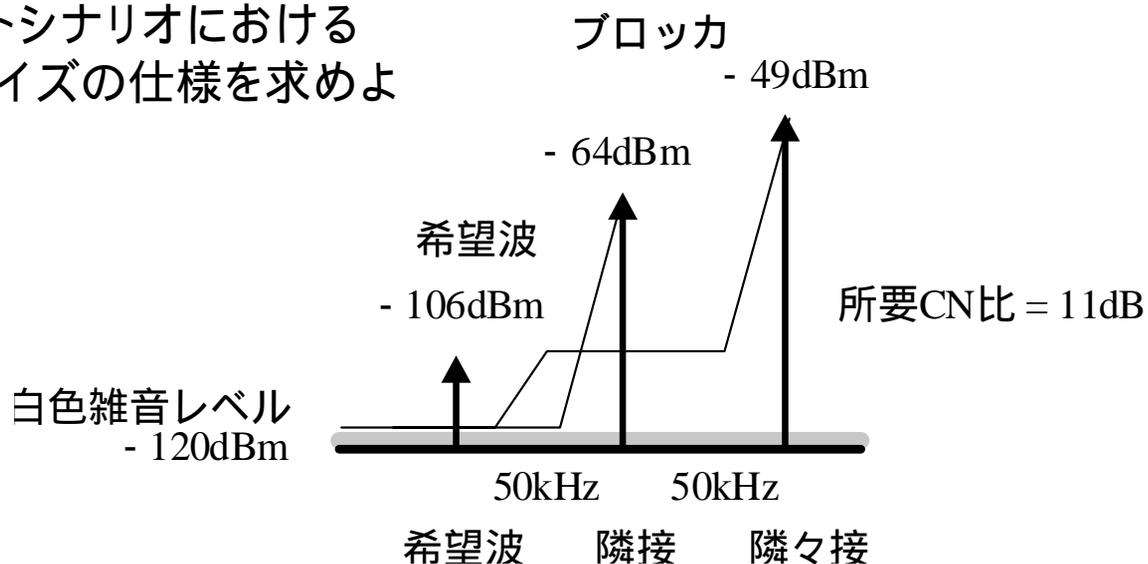
$$v_s = A \cos \omega_s t \qquad v_p = B(1 + \Delta m) \cos(\omega_p t + \Delta \theta)$$

信号のかけ算

$$\begin{aligned} v_i &= v_s \times v_p = AB(1 + \Delta m) \cos \omega_s t \cos(\omega_p t + \Delta \theta) \\ &= \frac{AB}{2} [\dots\dots + (1 + \Delta m) \cos((\omega_s - \omega_p)t + \Delta \theta)] \end{aligned}$$

ミキサによるフェーズノイズに関する解答

図に示すブロッカのテストシナリオにおける
受信機局発のフェーズノイズの仕様を求めよ



・希望波でのフェーズノイズレベル - 120dBm

・合計雑音レベル(- 120dBm) + (- 120dBm) = - 117dBm C/N = 11dB

$$- 64 - (- 120) = 56\text{dBc} \quad @50\text{kHz}$$

$$- 49 - (- 120) = 71\text{dBc} \quad @100\text{kHz}$$