

E. 半導体レーザの変調特性

実験課題

- a. 半導体レーザと光送信器の特性評価
- b. 歪波形の観測

キーワード: 半導体レーザ, レート方程式, 周波数特性, 偶数次歪, 奇数次歪, 第 3 次相互変調歪

keywords: laser diode, rate equation, frequency response, even-order/odd-order distortion, third order IMD (intermodulation distortion)

1. はじめに

1970 年頃から, 光通信工学の将来性が世に唱えられ, 現在すでに多くの分野でその有用性が認識され, 実用に供されている. 光通信以前にすでに技術体系が確立されている通常の電波を使用する通信においては, 電波の周波数や位相に情報信号をのせる変調方式(周波数変調, 位相変調, 直交振幅変調)や周波数変換の利用など, 洗練された通信方式が実用化された. 一方, 現在の光通信では, 最新の幹線系システムを除けば, 光の強度(振幅)を情報信号により変調するいわゆる強度変調方式がとられている. レーザ光を変調する方式として, 半導体レーザ(Laser Diode: LD)の注入電流を変調する直接変調方式(強度変調)と, LD 外部に光変調器を用意して変調を行う外部変調方式がある. 近距離用光通信では, 構成の簡単な直接変調が用いられる. また, 情報信号にはデジタル信号とアナログ信号がある. 直交周波数分割多重方式(Orthogonal Frequency-Division Multiplexing: OFDM)のように, 情報信号はデジタルであっても, 変調出力はダイナミックレンジの広いアナログ信号となる場合もある. このようなアナログ信号を品質よく伝送するためには, システムの直線性が重要である. 本実験では, 非線形特性(飽和特性)をあえて付与した直接変調による光送信器を用いて歪波形を発生させ, その観測を行う.

2. 実験

LD 注入電流 - 出力光強度特性は一般的に図 1 のようになる(資料 A1 参照). しきい値電流 I_{th} 以上の注入電流に対して, LD 強度はほぼ一定の割合で増加するので, あるバイアス電流 I_B に信号を重畳した注入電流 I_{LD} で LD を駆動することで, アナログ信号の強度変調が実現される. 図 2 に実験に用いる光送信器の回路図を示す. ファンクションジェネレータ(FG)からの交流信号と直流バイアス設定回路の直流電圧を重畳させる. バイアス電流設定用可変抵抗 R_V で LD のバイアス電流 I_B が設定できる. R_3 と D_2 からなるクリップ回路によって, 電圧が設定値($V_L + D_2$ の電圧降下)に制限される. オペアンプへの入力電圧と R_E で決まる電流が, トランジスタ Q のエミッタ電流 I_E となる. ここで, Q のエミッタ接地電流増幅率は 800 程度と 1 と比べて十分大きいので, $I_E = I_{LD}$ と考えて良い. フォトダイオード PD (Photo Diode)は, LD の光強度モニタ用として LD パッケージに内蔵されており, PD から

の光電流の大きさは LD 光強度に比例する. 電圧 V_E により LD に流れる注入電流値が, また V_{PD} により LD 出力光強度がモニタできる.

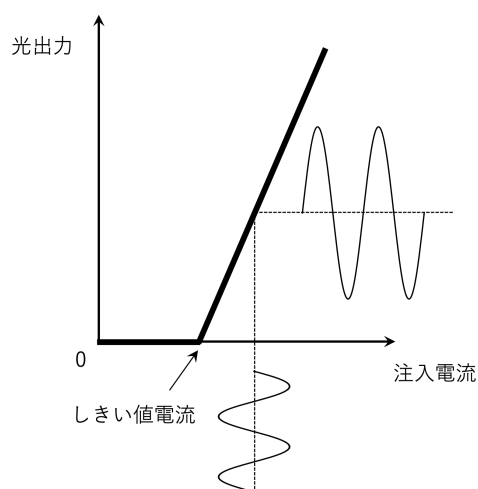
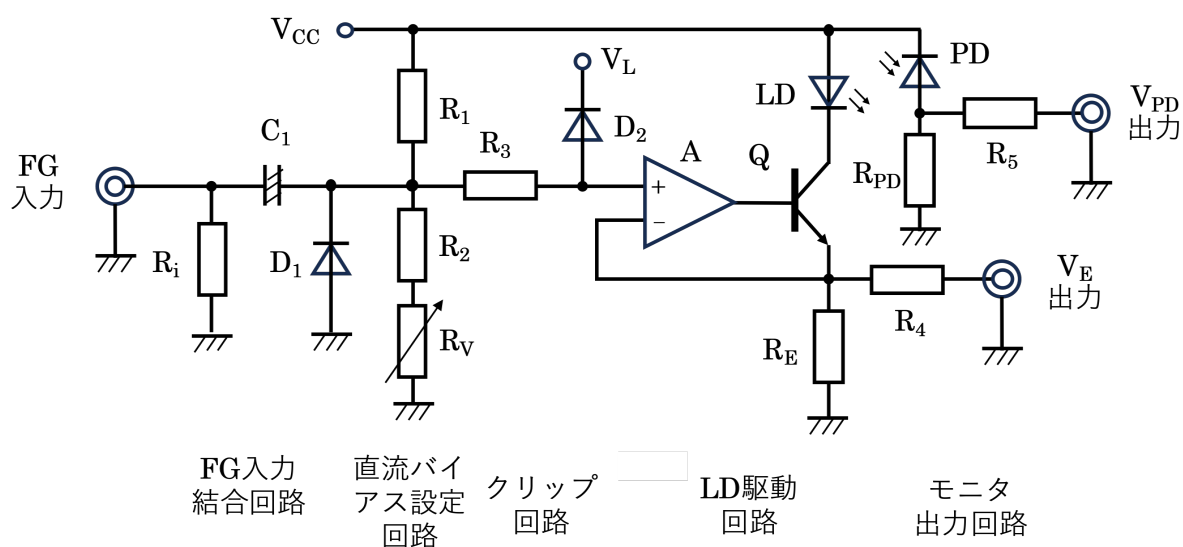


図 1 半導体レーザの代表的な注入電流-出力光強度特性



$R_i = 51 \, \Omega$, $C_1 = 22 \, \mu\text{F}$, $R_1 = 9.1 \, \text{k}\Omega$, $R_2 = 100 \, \Omega$, $R_V = 10 \, \text{k}\Omega$, $R_3 = 1 \, \text{k}\Omega$, $R_S = 200 \, \Omega$, $R_{PD} = 1 \, \text{k}\Omega$, $R_4 = R_5 = 3.3 \, \text{k}\Omega$, $V_{CC} = 10 \, \text{V}$, $V_L = 4.9 \, \text{V}$, D_1, D_2 : 1N5817, Q : 2SD1698K, A : OPA703

図 2 光送信器の回路図

図 3 に光送信器への入力電圧に対する出力光強度特性を示す. 光送信器内のクリップ回路のため, 出力はクリップレベルを超えない飽和特性を示す. 図 4 は, 2.2 の実験で行う線形領域を使った無歪強度変調の様子を示している. バイアスを線形領域の中心に設定すると, 変調の大きな無歪強度変調を実現できる. 図 5 は, 2.3 で行う実験の様子を示している. バイアスをしきい値に設定すると, 半波整流波形が出力できる. 図 6 は, 2.4 で行う実

験の様子を示している. バイアスを線形領域の中心に設定し, 入力信号の振幅を大きくすると奇数次歪が発生する(資料 A2 参照).

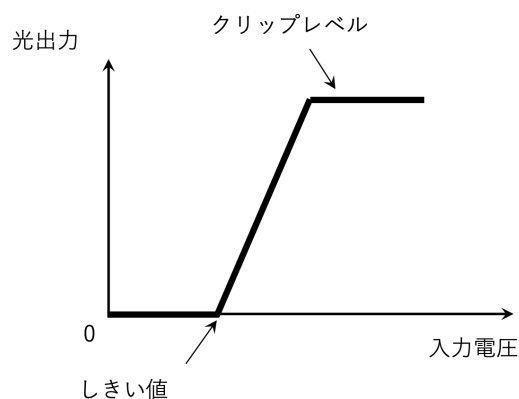


図 3 光送信器の入力電圧-光出力特性

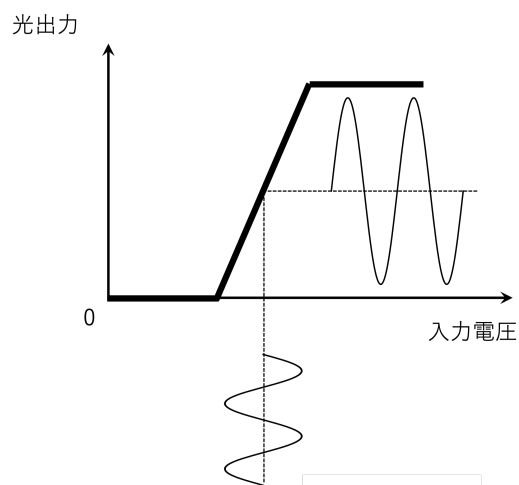


図 4 線形領域を使った無歪強度変調

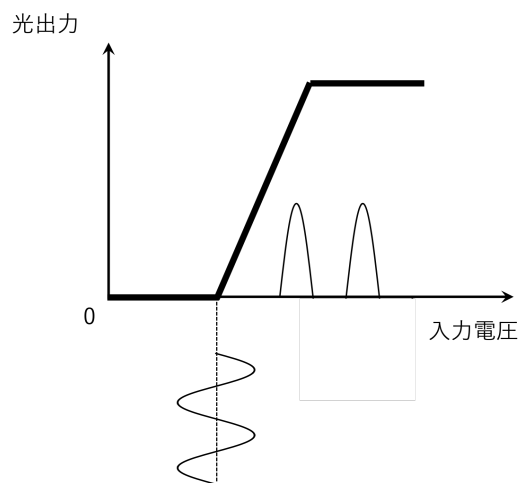


図 5 偶数次歪の観測 (2.3)

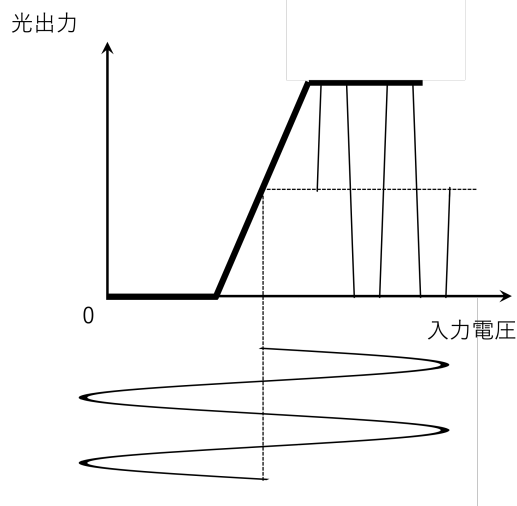


図 6 奇数次歪の観測 (2.4)

2. 1. 半導体レーザへの注入電流-光出力特性(I-P 特性)の測定

光送信器のエミッタ電圧 (V_E) 出力端子と PD 電圧出力端子 (V_{PD}) にデジタルマルチメータ (DMM) を接続し, R_V の目盛りに対する出力電圧 V_E と V_{PD} を測定する. これらの結果から, LD への注入電流 I_{LD} に対する PD 出力電流 I_{PD} のグラフを描け. 先述したように, トランジスタ Q のエミッタ電流 $I_E = I_{LD}$ と考えて良い.

2. 2. 光送信器の周波数特性測定

光送信器の FG 入力にファンクション・ジェネレータ (FG) 出力を, PD 出力 (V_{PD}) にオシロスコープを接続する. FG には 2 系統の出力があるが, どちらを用いても良い. 周波数を

1kHz, 電圧 (V_{in}) を $2V_{pp}$ (オフセット電圧は 0V) に設定して FG から正弦波を出力する. この時, オシロスコープに表示される V_{PD} の波形が歪まないように R_V を調整する. FG 周波数に対する V_{PD} を測定し, 片対数のグラフ用紙に, FG 周波数に対する $20 \log(V_{PD}/V_{in})$ [dB] のグラフを描け.

2. 3. 半波整流波形の周波数スペクトル(偶数次歪)観測

オシロスコープで観測される V_{PD} の波形が半波整流波形となるように R_V を調整する. オシロスコープで V_{PD} の周波数スペクトルを観測して, 奇数次高調波成分が最小となるように R_V を微調整し, この時の R_V の目盛りを記録する. また, 周波数スペクトルを USB メモリに保存する. 周波数スペクトルのデータから, 基本波レベルを 0 dB とした時の, 6 次までの偶数次高調波のレベルを表す表を描け.

2. 4. 奇数次歪の観測

FG 出力を $10V_{pp}$ に設定する. オシロスコープで観測される V_{PD} の時間波形が上下対称の波形となるように R_V を調整する. オシロスコープで V_{PD} の周波数スペクトルを観測して, 偶数次高調波成分が最小となるように R_V を微調整する. この時の, 時間波形と周波数スペクトルを USB メモリに保存する.

2. 5. 第 3 次相互変調歪の観測

電力合成器を用いて, FG の 2 つの出力(出力 1, 出力 2)を光送信器の FG 入力端子に接続する. 出力 1 と出力 2 の周波数をそれぞれ 1kHz, 1.1kHz, 電圧 (V_{FG1} と V_{FG2}) をどちらも $2V_{pp}$ とする. R_V を時間波形が歪まないように調整する. ただし, オシロスコープの時間軸は, 出力 1 と出力 2 のビート(差周波数)成分が観測できるように設定する. この時の時間波形と周波数スペクトルを USB メモリに保存せよ.

V_{FG1} と V_{FG2} をどちらも $10V_{pp}$ とする. R_V を上下対称の波形となるように調整する. さらに, 偶数次高調波成分が最小となるように R_V を微調整する. 次に, V_{FG1} と V_{FG2} を $V_{FG} = V_{FG1} = V_{FG2}$ としながら $1V_{pp}$ から $10V_{pp}$ まで変化させて以下を行う. R_V を上述のように調整する. 時間波形と周波数スペクトルを USB メモリに保存する. 保存した周波数スペクトルのデータから, 基本波成分と 3 次の相互変調歪成分の電圧 V_{1st} [dB] と V_{IMD3} [dB] を読み取る. 片対数のグラフ用紙に, V_{FG} に対する V_{1st} と V_{IMD3} のグラフを描け.

3. 検討課題

- (1) 実験 2.1 の結果から, しきい値電流 I_{th} を求めよ.
- (2) 実験 2.3 で半波整流波形が得られた時の LD のバイアス電流 I_B を求めよ. また, 偶数次高調波について得られた結果と理論値とを比較せよ.
- (3) 実験 2.5 では, 周波数の異なる 2 つの正弦波を信号として用いた. 実際のアナログ信号の場合はどの様になるだろうか.

4. 実験器具

光送信器, スクリーン, デジタルマルチメータ (DMM) 2 台, ファンクションジェネレータ (FG; 低周波発振器), デジタルオシロスコープ, 電力合成器, ノートパソコン, USB メモリ

資料 (Appendix)

A1. レート方程式

半導体レーザ内部の光子数密度 S と電子数密度 N は, 近似的に以下のレート方程式を満たす.

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= (N - N_g)BS - \frac{S}{\tau_p} \\ \frac{dN}{dt} &= -(N - N_g)BS - \frac{N}{\tau_s} + \frac{I}{eV_a}\end{aligned}$$

ここで, N_g , B , τ_p , τ_s , I , e , V_a は, 光増幅のしきい値となる電子数密度, 誘導放出の確率, 損失による光子の寿命時間, 自然放出による電子の寿命時間, 注入電流, 電気素量, 活性領域の体積である.

上式を定常状態 $\frac{d}{dt} = 0$ のもとで解くと, $I_{th} = \frac{eV_a}{\tau_s} \left(N_g + \frac{1}{\tau_p B} \right)$ とおいて

$I \leq I_{th}$ で $S = 0$, $I \geq I_{th}$ で $S = \frac{\tau_p}{eV_a} (I - I_{th})$ が得られる. レーザ外部に取り出される光出力パワー P は S に比例するから, 図 1 の特性が得られる. なお, 高周波数において緩和振動と呼ばれる共振状の現象が現れるが, 本実験で使用する周波数域ではこの影響を考慮する必要はない.

A2. 半波整流波形の周波数スペクトル

図 7 のように, 半波整流波形 $f(t)$ は, 正弦波 $f_1(t) = \sin \omega t$ と全波整流波形 $f_2(t)$ の和として考えることができる. $f_2(t)$ をフーリエ級数展開すると,

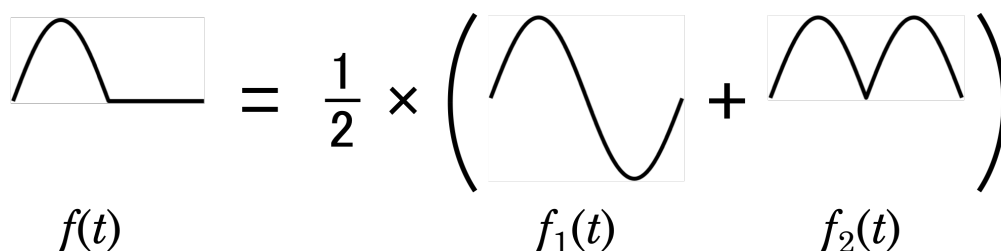

$$f(t) = \frac{1}{2} \times \left(f_1(t) + f_2(t) \right)$$

図 7 半波整流波形の周波数スペクトルの求め方の例

$$f_2(t) = \frac{2}{\pi} + \frac{4}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\cos 2k\omega t}{(1+2k)(1-2k)} \quad \text{であるから,}$$

$$f(t) = \frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{\pi} \left(\frac{1}{3} \cos 2\omega t + \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t \cdots \right)$$

と求められる.

A3. 歪波の発生とその性質

図 8 のように, 入力 x , 出力 y の系を考える. ここで, 系の特性は時間的には変化せず一定であるとする(時不変という).

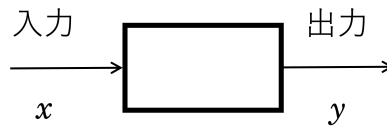


図 8

ここで, 系の特性が線形なら

$$y = a_1 x$$

となり, 出力波形は入力波形に比例し歪は発生しない. 次に, 系の特性が非線形である場合を考える. この時, x と y の間の関係は

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4 + \dots$$

のように展開することができる. この場合, 出力波形には入力波形に比例した項以外の成分が含まれるので, 歪が発生する. x^2 の項に起因する歪を 2 次歪, x^3 の項に起因する歪を 3 次歪という. 図 9 および図 10 に, 2 次歪および 3 次歪発生が発生する様子を示す. 図からも容易にわかるように, 奇数次による歪を含む出力は上下対称, 偶数次による歪を含む出力は上下非対称の波形となる.

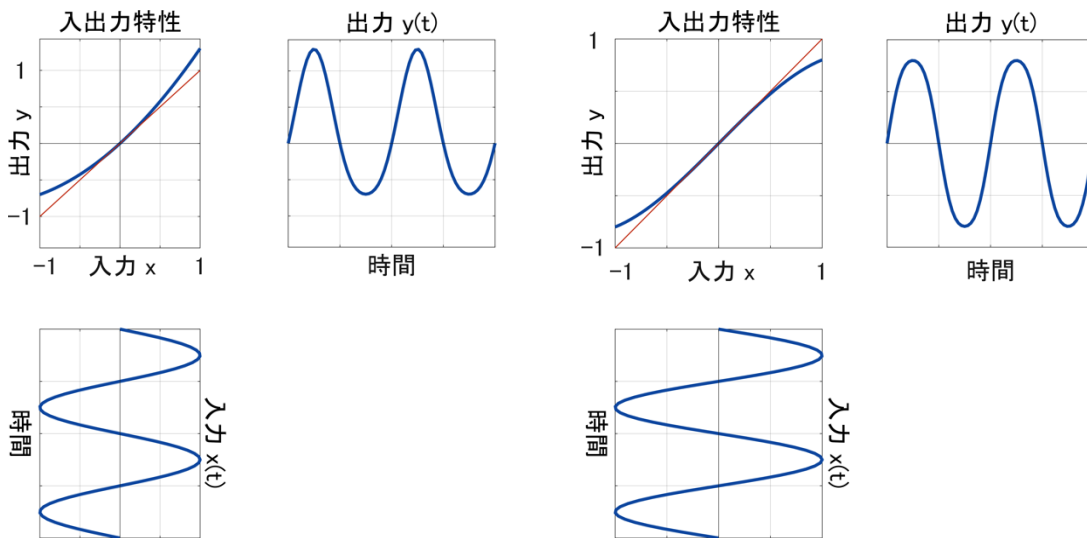


図 9 2 次歪発生の様子 ($a_1 = 1, a_2 = 0.3$) 図 10 3 次歪発生の様子 ($a_1 = 1, a_3 = -0.2$)

次に, 系に正弦波 $x = A \sin \omega t$ を入力した場合を考える. 2 次歪の成分は

$$a_2 x^2 = \frac{a_2}{2} A^2 (1 - \cos 2\omega t)$$

となり, 直流成分と 2 倍の周波数成分(第 2 高調波という)からなることがわかる. 一方, 3 次

歪の成分は

$$a_3 x^3 = \frac{a_3}{4} A^3 (3 \sin \omega t - \sin 3\omega t)$$

となり, 入力信号の基本波成分と第 3 高調波からなることがわかる.

さらに, 系に振幅が等しく周波数の異なる 2 つの正弦波 $x = A(\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t)$ を入力した場合を考えよう. この時, 2 次歪の成分は

$$a_2 x^2 = \frac{a_2}{2} A^2 [2 - \cos 2\omega_1 t - \cos 2\omega_2 t \\ + 2 \cos(\omega_1 - \omega_2)t - 2 \cos(\omega_1 + \omega_2)t]$$

となり, 直流成分と各正弦波の第 2 高調波, 和周波, 差周波成分が含まれることになる. 3 次歪については

$$a_3 x^3 = \frac{a_3}{4} A^3 [9 \sin \omega_1 t + 9 \sin \omega_2 t - \sin 3\omega_1 t - \sin 3\omega_2 t \\ - 3 \sin(2\omega_1 + \omega_2)t - 3 \sin(2\omega_2 + \omega_1)t \\ - 3 \sin(2\omega_1 - \omega_2)t + 3 \sin(2\omega_2 - \omega_1)t]$$

となる. このうち, $2\omega_1 - \omega_2$ 成分と $2\omega_2 - \omega_1$ 成分を第 3 次相互変調歪 (Inter Modulation Distortion; IMD) という. $\omega_1 \neq \omega_2$ の場合, 図 11 に示すように $2\omega_1 - \omega_2$ 成分と $2\omega_2 - \omega_1$ 成分は入力信号に近い周波数に現れるので, 高度な補償技術を用いない限り, フィルタなどで抑圧することが難しい. 図 12 に基本波成分および第 3 次 IMD の入力振幅依存性を示す. 3 次歪成分は入力振幅の 3 乗に比例するから, 第 3 次 IMD は基本波成分の 3 倍の傾きで増加する. 基本波成分と第 3 次 IMD を直線で補完した交点を 3 次のインターセプトポイント (Third-order intercept point; IP3) といい, 高周波増幅器や周波数変換器, 受信器などの直線性を表すパラメータとして広く用いられている.

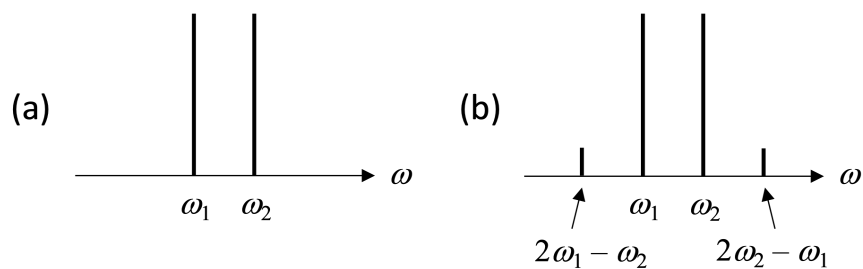


図 11 (a) 入力と (b) 3 次歪を含む出力の入力信号周波数近くのスペクトル

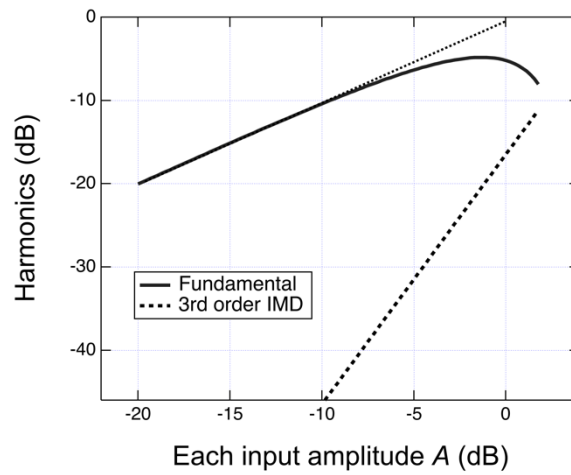


図 12 基本波成分および第 3 次 IMD の入力振幅依存性 ($a_1 = 1, a_3 = 0.1$)

参考文献

1. 上林・貴堂 「光エレクトロニクス」 森北出版
2. 西原・裏 「光エレクトロニクス入門」 コロナ社
3. 菅野 「改定電磁気計測」 コロナ社
4. 末武・杉浦 「図解 EMC 用語早わかり」 オーム社