

FSK/IM同時変調の解析および応用

川西 哲也[†] 坂本 高秀[†] 品田 聡[†] 藤田 貴公^{††} 日隈 薫^{††}

市川潤一郎^{††} 井筒 雅之[†]

[†]情報通信研究機構 〒184-8795 東京都小金井市貫井北町4-2-1

^{††}住友大阪セメント 〒274-8601 千葉県船橋市豊富町585

E-mail: [†]kawanish@nict.go.jp

あらまし 光FSK変調技術を利用したFSK/IM同時変調の解析を行い、その応用を検討する。光FSK変調器は光SSB変調器をベースとして開発され、出力光周波数の高速切り替えを実現するものである。2つのマッハツェンダー光変調器を並列した構造で、変調により発生するサイドハンドのうち、上側波帯、下側波帯のいずれかのみを切り替えて出力する。光FSK変調器は強度変調された光を入力とすることが可能で、FSK/IM同時変調信号が生成できる。
キーワード 光周波数、光変調、単側波帯

Simultaneous optical modulation of FSK and IM

Tetsuya KAWANISHI[†], Takahide SAKAMOTO[†], Satoshi SHINADA[†], Takahisa FUJITA^{††}, Kaoru HIGUMA^{††}, Junichiro ICHIKAWA^{††}, and Masayuki IZUTSU[†]

[†] National Institute of Information and Communications Technology 4-2-1 Nukui-kita, Koganei, Tokyo 184-8795, Japan

^{††} Sumitomo Osaka Cement, 585 Toyotomi, Funabashi, Chiba 274-8601, Japan
E-mail: [†]kawanish@nict.go.jp

Abstract We investigate simultaneous optical modulation of frequency-shift-keying (FSK) and intensity-modulation (IM). The FSK/IM signal can be generated by using an optical FSK modulator, which is based on an optical single-sideband modulator consisting of two Mach-Zehnder interferometers. The FSK modulator outputs one of the sideband components generated in the interferometers. The FSK switching speed was faster than 100 ps.

Key words Optical frequency, optical modulation, single-sideband

1. はじめに

従来、FSK信号発生にレーザの直接変調が利用されており、実用的なFSK変調帯域は数100MHz程度である。これに対して、我々の研究グループでは光SSB変調技術をベースとした光FSK変調器を提案している [1]。光FSK変調器は2つのマッハツェンダー (MZ) 構造からなり、この2つのMZ構造の間の光位相差を電氣的に制御することで、出力光の光周波数の切り替えが可能となる。光FSK変調器の動作原理は基本的に光SSB変調器のそれと同じで、光変調により発生する側波帯のうち上側波帯または下側波帯のいずれかのみを出力として取り出すことができるというものである。光FSK変調器は側波帯の切り替えのための位相変調部分に進行波型電極を用い

て広帯域化したもので、光周波数切り替え速度は変調電極の帯域に依存し、数10ps以下の切り替え速度を実現することも可能である。

光FSK変調は古くはコヒーレント光伝送システムの一方として研究がなされていたが [2]、最近では光パケットシステムのラベル信号伝送のための変調方式として注目されている [3], [4]。光パケットシステムではラベル情報をペイロードと異なる変調方式で伝送することで、ノードの処理能力向上を図ることができる。各ノードではラベル情報のみを処理し、ペイロードは光信号のまま通過させることが可能となる。ペイロードには一般的な強度のON/OFFに信号をのせる方式 (IMDD) を利用し、ラベル信号はFSKをはじめとしてDPSKなどのIMDDと同時伝送可能な変調方式を用いる方法が報告

されている。

本報告では光FSK変調器を用いた周波数シフトキーイング・強度変調 (FSK/IM) 同時変調技術を紹介する。従来の直接変調方式では、レーザの注入電流を変調することで発振波長を変化させて光FSK信号を生成し、それに外部強度変調器でIM変調を施すという構成で実現される。これに対して、光FSK変調器を用いた場合、FSKとIMの変調の順序が自由に選択できる。これにより、強度変調された光信号を入力として、光周波数にFSK信号を重畳させることが可能となる。また、搬送波抑圧両側波帯変調 (DSB-SC) を用いることでFSK信号を消去し、もとのIM信号に戻すことが可能で、非常にシンプルな構成でラベルスワップが実現できる。本報告ではラベル消去時に残留する位相変調成分について、議論する。また、RZ変調との組み合わせで光によるUWB信号の発生、高密度光FSK伝送を実現することが可能で、これらについてもあわせて紹介する[5]。

2. 光FSK変調器の動作原理

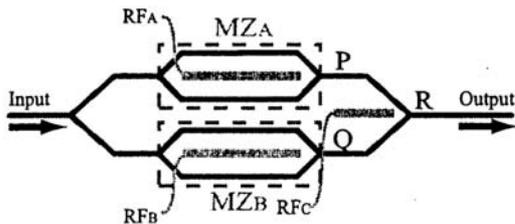


図1 光FSK変調器

図1に光FSK変調器の基本構成を示す。X-cut LiNbO₃基板上に形成された2組のMZ構造 (MZ_A, MZ_B) からなる[6], [7]。MZ構造にはそれぞれ電極RF_A, RF_Bが設けられている。これらは進行波型電極で数10GHzまでの信号に応答することが可能であり、コプレーナ線路の用いてMZ構造の各アームに逆相で電圧がかかる構造になっている[8]。これらの2つの電極 (RF_A, RF_B) に互いに90度位相のずれた正弦波RF信号を入力する。各MZ構造のバイアス点はNull点 (キャリアが最小となる状態) に設定する。MZ_A, MZ_Bの出力点 (P, Q) では上側波帯成分 (USB) と下側波帯成分 (LSB) が得られる。入力光と同じ光周波数をもつ成分 (キャリア) はP, Q点での干渉で抑圧されている。USB, LSBの光周波数はそれぞれ $f_0 + f_m$, $f_0 - f_m$ 、である。ここで f_0 は入力光の光周波数、 f_m は電極RF_A, RF_Bに供給される正弦波信号の周波数である。図2, 3にFSK変調器内部での各点での光スペクトルを示した。電極RF_Cに印加する電圧でMZ_A, MZ_Bの出力光の位相関係を調整することができる。図2ではR点でLSBが干渉で抑圧され、USBのみが出力として

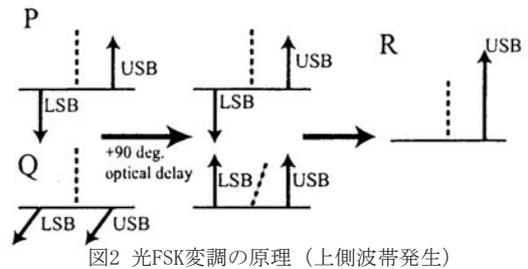


図2 光FSK変調の原理 (上側波帯発生)

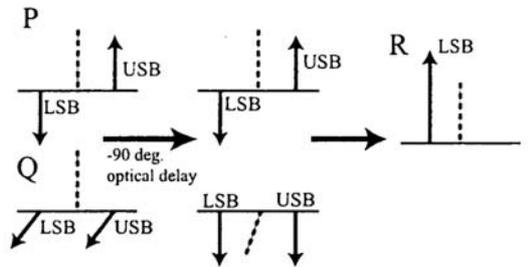


図3 光FSK変調の原理 (下側波帯発生)

取り出される。図3では逆にUSBが抑圧され、LSBのみが出力として取り出される。サイドハンド (USB, LSB) の切り替えは電極RF_Cに印加する電圧を変化させることで実現できる。切り替えに要する時間はRF_Cで構成される位相変調部分の応答速度に依存するが、進行波電極を用いることで周波数帯域数10GHz程度まで動作可能なFSK変調器の実現が期待できる。

以下で出力光スペクトルの数学的表現を与える。電極RF_Aに供給する信号によるMZ_Aの各アームでの光位相の変化を $A_m \cos \omega_m t$ とする。ここで $\omega_m = 2\pi f_m$ である。同様に、MZ_Bでの光位相の変化を $A_m \sin \omega_m t$ とする。2つのMZ構造 (MZ_A, MZ_B) の出力光はそれぞれ

$$P = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[e^{i(\omega_0 t + A_m \cos \omega_m t)} - e^{i(\omega_0 t - A_m \cos \omega_m t)} \right] \quad (1)$$

$$Q = \frac{1}{2\sqrt{2}} \left[e^{i(\omega_0 t + A_m \sin \omega_m t)} - e^{i(\omega_0 t - A_m \sin \omega_m t)} \right] \quad (2)$$

で表現される。ここでP, Qは点P, Qでの導波光を表し、入力光は $e^{i\omega_0 t}$ であるとする。第一種ベッセル関数 J_n (n: 次数) を用いると、Pは

$$P = i \frac{e^{i\omega_0 t}}{\sqrt{2}} \sin(A_m \cos \omega_m t) \quad (3)$$

$$= \sqrt{2} i e^{i\omega_0 t} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(A_m) \cos \{(2k+1)\omega_m t\} \quad (4)$$

$$= \frac{i}{\sqrt{2}} e^{i\omega_0 t} \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(A_m) \{ e^{i(2k+1)\omega_m t} + e^{-i(2k+1)\omega_m t} \} \quad (5)$$

同様にQは

$$Q = i \frac{e^{i\omega_0 t}}{\sqrt{2}} \sin(A_m \sin \omega_m t) \quad (6)$$

$$= \sqrt{2} i e^{i\omega_0 t} \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(A_m) \sin \{(2k+1)\omega_m t\} \quad (7)$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2}} e^{i\omega_0 t} \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(A_m) \left\{ e^{i(2k+1)\omega_m t} - e^{-i(2k+1)\omega_m t} \right\} \quad (8)$$

と表すことができる。電極RF_Cに印加する電圧によりPからRに至る導波路に誘起される光位相変化を $f(t)$ とする。同様にQからRに至る導波路に誘起される光位相変化を $-f(t)$ で表すことができる。点Rでの導波光は

$$R = \frac{1}{\sqrt{2}} \left[P \times e^{if(t)} + Q \times e^{-if(t)} \right] \quad (9)$$

と表現される。これに式(5)，(8)を代入すると、

$$R = \frac{e^{i\omega_0 t}}{2} \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(A_m) \times \left\{ \left[i \cdot (-1)^k e^{if(t)} + e^{-if(t)} \right] e^{i(2k+1)\omega_m t} + \left[i \cdot (-1)^k e^{if(t)} - e^{-if(t)} \right] e^{-i(2k+1)\omega_m t} \right\} \quad (10)$$

$$= \frac{e^{i[\omega_0 t + \pi/4]}}{2} \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(A_m) \times \left\{ \left[(-1)^k e^{i[f(t) + \pi/4]} + e^{-i[f(t) + \pi/4]} \right] e^{i(2k+1)\omega_m t} + \left[(-1)^k e^{i[f(t) + \pi/4]} - e^{-i[f(t) + \pi/4]} \right] e^{-i(2k+1)\omega_m t} \right\} \quad (11)$$

$$= e^{i[\omega_0 t + \pi/4]} \sum_{k=0}^{\infty} \left[J_{4k+1}(A_m) \times \left\{ \cos[f(t) + \pi/4] e^{i(4k+1)\omega_m t} + i \sin[f(t) + \pi/4] e^{-i(4k+1)\omega_m t} \right\} - J_{4k+3}(A_m) \left\{ i \sin[f(t) + \pi/4] e^{i(4k+3)\omega_m t} + \cos[f(t) + \pi/4] e^{-i(4k+3)\omega_m t} \right\} \right] \quad (12)$$

$$= e^{i[\omega_0 t + \pi/4]} \left[\cos[f(t) + \pi/4] \times \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(A_m) e^{i(-1)^k (2k+1)\omega_m t} + i \sin[f(t) + \pi/4] \times \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k J_{2k+1}(A_m) e^{-i(-1)^k (2k+1)\omega_m t} \right] \quad (13)$$

$$= e^{i[\omega_0 t + \pi/4]} \left[\cos[f(t) + \pi/4] \times \left\{ J_1(A_m) e^{i\omega_m t} - J_3(A_m) e^{-i3\omega_m t} + J_5(A_m) e^{i5\omega_m t} - J_7(A_m) e^{-i7\omega_m t} + \dots \right\} + i \sin[f(t) + \pi/4] \times \left\{ J_1(A_m) e^{-i\omega_m t} - J_3(A_m) e^{i3\omega_m t} + J_5(A_m) e^{-i5\omega_m t} - J_7(A_m) e^{i7\omega_m t} + \dots \right\} \right] \quad (14)$$

となる。1次の側帯波の発生効率 $J_1(A_m)$ が最大となるのは $A_m = 1.84 = 0.586\pi$ のときである。光FSK変調器は1次側帯波を利用するデバイスであるため $A_m \leq 0.586\pi$ で動作させる。この場合、5次以上の高次項の影響は小さく近似的に

$$R = e^{i[\omega_0 t + \pi/4]} \left[\cos[f(t) + \pi/4] \right.$$

$$\times \left\{ J_1(A_m) e^{i\omega_m t} - J_3(A_m) e^{-i3\omega_m t} \right\} + i \sin[f(t) + \pi/4] \times \left\{ J_1(A_m) e^{-i\omega_m t} - J_3(A_m) e^{i3\omega_m t} \right\} \quad (15)$$

と表すことができる。3次項 J_3 は位相変調の非線形性による歪み成分で、RF_A、RF_Bに3次高調波成分 $3f_m$ を基本波成分 f_m と同時に供給することで抑圧することが可能である。3次成分の影響が小さいとすると

$$R = e^{i[\omega_0 t + \pi/4]} \left[\cos[f(t) + \pi/4] J_1(A_m) e^{i\omega_m t} + i \sin[f(t) + \pi/4] J_1(A_m) e^{-i\omega_m t} \right] \quad (16)$$

となる。 $f(t) = -\pi/4$ のときにUSBのみが、逆に $f(t) = +\pi/4$ のときにLSBのみが、R点で出力として得られることがわかる。電極RF_Cに印加する電圧で生じる2つのアーム間での光位相差は $2f(t)$ であるので、位相差を $+\pi/2$ 、 $-\pi/2$ のどちらかにすることで出力される側帯波を切り替えることができることがわかる。例えば、ベースバンド信号が“1”のときに $f(t) = -\pi/4$ 、“0”のときに $f(t) = +\pi/4$ とすることで光FSK信号の発生が実現できる。

3. FSK変調器の基礎特性

図4に作製した光FSK変調器の外観と内部を示す。電極RF_A、RF_B、RF_Cには進行波電極を用いた。図5に各電極の周波数特性とFSK伝送の周波数特性を示した。また、周波数シフト量7.5GHzであるのときの出力光スペクトルもあわせて示した。各電極の3dB帯域は17GHz程度であったが、FSK伝送特性は15GHz以上の周波数で低下している。これはFSK復調に用いた光フィルタの透過帯域幅の制限によるものと考えられる。出力光は位相変調の高調波発生により不要な3次高調波成分をふくむが、3倍波を同時供給することでこれを抑圧することができる[9]。その結果、変換効率-12.9dB、SNR33.7dBを実現した。位相変調での変換損が7.2dB、光導波構造内部での導波損は5.7dBであった。図6に光FSK伝送

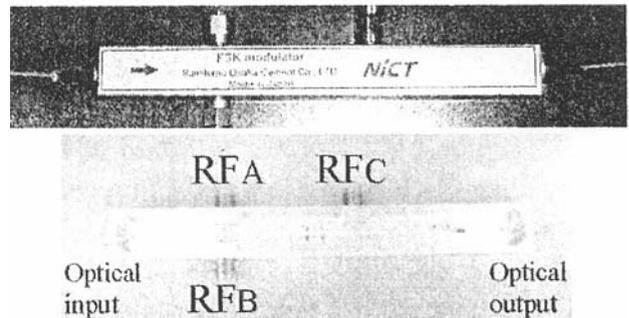


図4 光FSK変調の外観(上)、内部(下)

の実験系構成とアイダイアグラム、BERカーブを示し

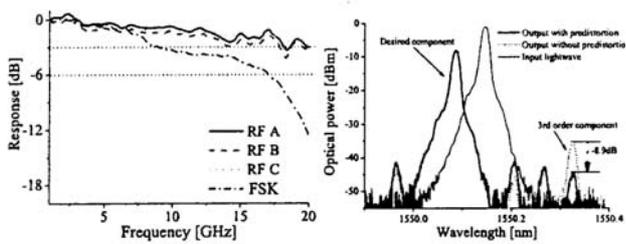


図5 各電極の周波数応答 (左): RF A, B, C強度変調としての応答, FSK FBG で復調されたFSK信号の応答、出力光スペクトル (右)

た。シングルモードファイバ (SMF) 95kmで分散補償無しで10GbpsFSK信号のエラーフリー伝送が実現した。 f_m は12.5GHzであった。

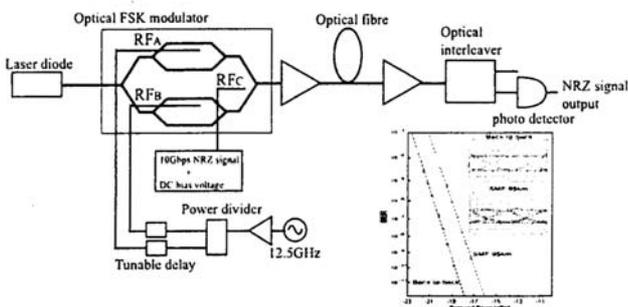


図6 光FSK変調伝送 (SMF95km)

4. FSK/IM同時伝送およびDSB-SC変調を用いたFSK光ラベルの消去

FSK/IM信号は直列に接続された光FSK変調器と光強度変調器 (接続の順序は問わない) で発生できる。IM変調された光信号を光FSK変調器に入力し2つの周波数成分 f_0+f_m, f_0-f_m を得る。USB (f_0+f_m) にシフトしている状態をFSKの“1”状態、LSB (f_0-f_m) にシフトしている状態をFSKの“0”状態、とする。図7に実験系と測定結果 (IM信号とFSK信号のBERカーブ、復調されたIM, FSK信号のアイダイアグラム、ラベル消去で用いたバンドパスフィルタの入力点、出力点での光スペクトル、ラベル消去後のアイダイアグラム) を示す。IM信号は9.95Gbps NRZ PRBS ($2^{31}-1$) 信号を、FSK信号は1Gbps NRZ PRBS ($2^{31}-1$) 信号を用いた。光周波数シフト量 (f_m) は12.5GHzとした。FSK/IM信号は直接、光検出器 (PD) に入力するとIM信号成分が復調できる。FSK信号はUSBとLSBを弁別できる光フィルタを通してFM-IM変換を行うことで光検出器で復調できる。IM信号にはFSK信号からのクロストークがないのに対して、FSK信号にはIM信号からのクロストークが現れる。FSK信号の復調のためにはIM信号の消光比を低く抑える必要があり、3.9dBとした。FSK信号、IM信号

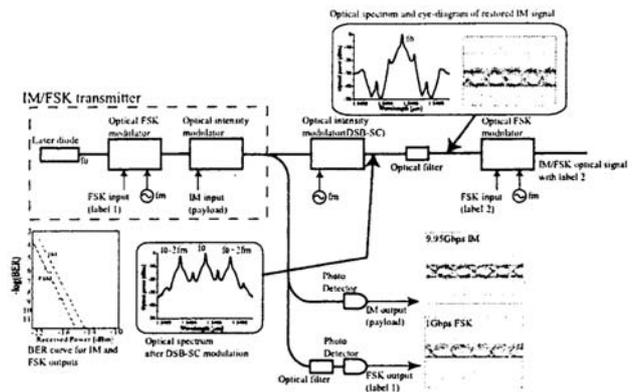


図7 光FSK/IM同時変調とラベル消去

ともエラーフリーの復調が可能であることを確認した。

図8にFSK/IM同時変調とラベル消去の原理を示す。FSK/IM信号にDSB-SC変調 (変調周波数 f_m) を施すと、“1”状態の場合には f_0, f_0+2f_m の2つの成分が、“0”状態の場合には f_0, f_0-2f_m の2つの成分が、それぞれ生成される。どちらの状態の場合にも f_0 成分が含まれるので、この成分だけを光バンドパスフィルタで取り出すことで、FSK信号の状態に依存しないもとのIM信号と同等のものが得られる。図7に示すように、復元されたFSK信号を含まないIM信号において良好なアイ開口が得られ、エラーフリーの復調も確認できた。復元されたIM信号を別のFSK変調器に入力することで新たなFSK信号を重畳させることができる。

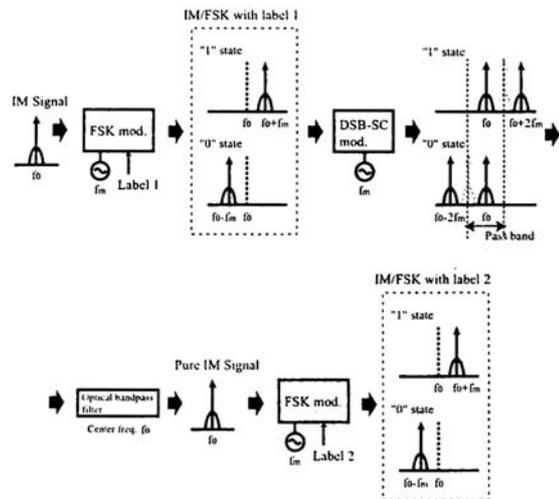


図8 光FSK変調器によるFSK/IM信号の発生とFSKラベル信号消去の原理

図8ではIM信号のビットレートがFSK信号のそれよりも大きいとしてFSK変調によるスペクトルの広がりを無視しているが、以下でその影響を議論する。FSK変調信号に周波数シフト量 f_m 、に相当する正弦波信号でDSB-SC変調したときに得られる出力光を解析する。DSB-SC変調はMZ強度変調器においてバイアスをNull点とする

ことで実現できる。X-cut LN 基板上に作製したMZ構造を仮定すると出力光は

$$\begin{aligned} & i e^{i\omega_0 t} \sin(A'_m \sin \omega'_m t) \\ = & e^{i\omega_0 t} \left[J_1(A'_m) \{ e^{i\omega'_m t} - e^{-i\omega'_m t} \} \right. \\ & \left. + J_3(A'_m) \{ e^{i3\omega'_m t} - e^{-i3\omega'_m t} \} + \dots \right] \end{aligned} \quad (17)$$

で与えられる。ここで、入力光は無変調光 $e^{i\omega_0 t}$ であるとした。各アームに誘起される光位相変化を $A'_m \sin \omega'_m t$ である。式 (17) より、DSB-SC変調は入力光に $i \sin(A'_m \sin \omega'_m t)$ を掛けることで表されることがわかる。FSK変調の出力:式 (15) に式 (17) を掛けると

$$\begin{aligned} & e^{i(\omega_0 t + \pi/4)} \\ & \times \left[\cos[f(t) + \pi/4] \{ J_1(A_m) e^{i\omega_m t} - J_3(A_m) e^{-i3\omega_m t} \} \right. \\ & \left. + i \sin[f(t) + \pi/4] \{ J_1(A'_m) e^{-i\omega'_m t} - J_3(A'_m) e^{i3\omega'_m t} \} \right] \\ & \times \left[J_1(A'_m) \{ e^{i\omega'_m t} - e^{-i\omega'_m t} \} + J_3(A'_m) \{ e^{i3\omega'_m t} - e^{-i3\omega'_m t} \} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

となる。ここで、5次以上の光は無視した。 $\omega_m \approx \omega'_m$ であるとして、バンドパスフィルタで光周波数 $f_0 = \omega_0 / 2\pi$ 付近の成分のみを取り出すと

$$\begin{aligned} & \left[J_1(A_m) J_1(A'_m) \{ -\cos[f(t) + \pi/4] e^{i(\omega_m - \omega'_m)t} \} \right. \\ & \left. + i \sin[f(t) + \pi/4] e^{-i(\omega_m - \omega'_m)t} \} \right. \\ & \left. - J_3(A_m) J_3(A'_m) \{ \cos[f(t) + \pi/4] e^{-3i(\omega_m - \omega'_m)t} \} \right. \\ & \left. - i \sin[f(t) + \pi/4] e^{3i(\omega_m - \omega'_m)t} \} \right] \times e^{i(\omega_0 + \pi/4)t} \end{aligned} \quad (19)$$

が得られる。さらに、ここで $\omega_m = \omega'_m$ として、3次以上の項を無視すると近似的に

$$-e^{i\omega_0 t - if(t)} \times J_1(A_m) J_1(A'_m) \quad (20)$$

で表現できる。これは、DSB-SC変調の出力はFSK変調器の入力光にFSK変調信号による位相変調成分が加わったものであることを意味している。FSK変調し、DSB-SC変調とフィルタでIM信号に戻されたものは、元の信号 (FSK変調器の入力光) と強度は同じであるが、チャープ (位相変調) としてFSK信号が残留する。これによりもとのIM信号よりもスペクトルが広がることになる。DSB-SC変調によるラベルスワップを繰り返す場合には、残留位相変調の影響を見積もる必要がある。

5. RZパルス化によるFSK過渡状態の制御

FSK変調の光周波数切り替え時の過渡状態においては、USB成分とLSB成分が同時に存在する。この両成分間のビートにより、光強度が大きく振動する。この光強度の振動による光FSK変調の伝送特性劣化の原因となる可能性もあるが、逆にこの振動をUWB (RFパルス) 信号として積極利用することも検討されている同。ここ

では、FSK変調器に直列接続されたMZ強度変調器を用いた、過渡状態でのビート成分生成効率の制御を提案する。強度変調器によりFSK信号をRZ化することでビート成分の生成効率の抑圧、増大が可能である。光FSK変調器の電極RF_cにベースバンド信号 (f bit/s) を供給する。RF_A, RF_Bに供給する正弦波信号の周波数は f_m とする。一方、直列に接続されたpush-pull型MZ変調器は周波数 f の正弦波信号により駆動される。バイアス点は変調器の透過率が最大値の半分となるように設定し、変調度 (消光比) が最大となるように正弦波信号の振幅を調整する。MZ変調器で生成されるRZパルスとFSK信号との位相差によってビート成分の生成効率が制御できる。光FSK信号を伝送信号として用いる場合には、ビート成分の強度を低減化することが望ましい。この場合には、FSK信号の符号遷移時に光強度がゼロレベルとなるようRZパルスの位相を調整する。一方、ビート成分を積極利用し、UWB on fiber信号 (RFパルスで強度変調された元信号成分) の生成効率を改善するためには、周波数切り替えとRZパルスの出力最大時のタイミングを一致させればよい。この場合、過渡状態以外の成分が抑圧され、UWB on fiber信号生成効率が上昇する。

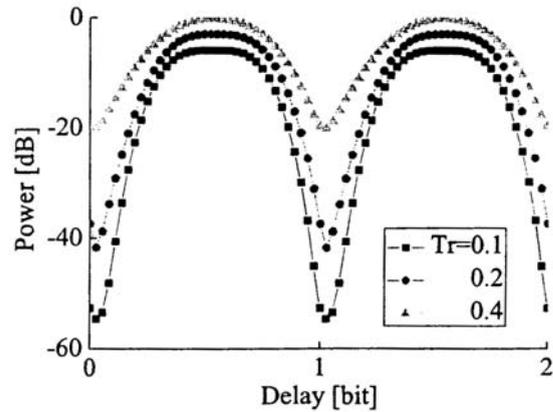


図9 FSK周波数切り替え時に生成されるUWB of fiber信号強度とRZパルス、FSK信号間のディレイの関係

ここでは、RZ化によりもたらされる周波数切り換え時の過渡信号の抑圧効率 (あるいは生成効率) を評価する。光通信システムシミュレータoptisystem™3.1を用いて、強度変調 (RZ) と光FSK変調とを直列接続した場合の出力信号を解析した。図9にUWB on fiber信号強度をRZパルスとFSK信号との間のディレイの関数としたものを示す。横軸はFSK信号のビットで規格化されている。RZパルスの強度が最小となるタイミングがFSK信号の周波数切り替えのそれと一致する状態をディレイ=ゼロと定義している。数値計算では $f = 2.0 \times 10^8$, $f_m = 1.0 \times 10^{10}$

とした。■点、●点及び▲点は、周波数切り替え時の過渡時間 (T_r) がそれぞれ0.1, 0.2及び0.4 (単位はビット長) の場合を示す。ただし、簡単のため、立ち上がり時間と立ち下がり時間は等しいものとした。また、UWB on fiber信号強度は光検出器で光強度を電気信号に変換し $2f$ の周りを十分に広域な透過特性を持つRFバンドパスフィルタを通したものとした。光周波数切り替えとRZパルス強度最小のタイミングが一致 (ディレイ=0) するとき、UWB信号が最小となることがわかる。逆に、切り替えとRZパルス強度最大のタイミングが一致 (ディレイ=0.5) するときUWB信号強度が最大となる。よって、RZパルスの位相を調整することでUWB信号成分の生成効率を制御できることがわかる。図10にディレイ=0の場合と、ディレイ=0.5の場合の光強度時間変化を示した。 $T_r=0.4$ とした。横軸はFSK信号のビットで規格化されている。ディレイ=0.5の場合には上側波帯と下側波帯のビートによるUWB信号成分が大きく発生していることがわかる。ディレイ=0の場合にもビート成分が存在するが、これはFSK変調に非線形性による3次高調波と基本波成分との干渉によるもので、これを抑圧するためには変調度を低く抑える、または、3倍波をあらかじめ変調信号に所定の位相関係で同時供給する手法 [9] を用いる必要がある。

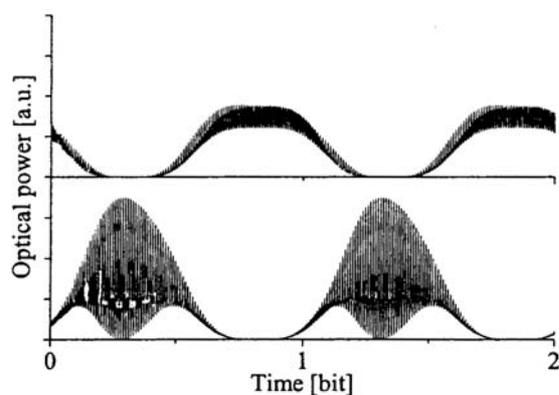


図10 RZ-FSK信号の時間波形: (上) ディレイ=0.0, (下) ディレイ=0.5

6. まとめ

本報告では光FSK変調器の動作と、DSB-SC変調を用いたFSKラベル消去の数学的表現を与え、その特性を議論した。ラベル消去ではスペクトル形状はほぼ元のIM信号のそれと同様のものに復元されるが、FSK信号成分を残留位相変調として含むことを示した。ラベルスワップを複数回繰り返す場合にはこれによる影響を考慮する必要がある。また、作製したFSK変調器の基本特性を示

した。各電極の周波数帯域は17GHz程度であり、高調波抑圧の手法を用いることで出力光のSNR 33.7dBが得られた。さらに、FSK信号のRZ化について議論した。RZパルス信号の位相を調整することでUSB, LSB信号のビート成分 (UWB of fiber信号) の生成効率が制御可能であることを示した。

謝辞

本研究を行うにあたりご指導、ご支援賜りました情報通信研究機構基礎先端部門土屋昌弘グループリーダーに深く感謝いたします。

文 献

- [1] T. Kawanishi, T. Sakamoto, S. Shinada, M. Izutsu, K. Higuma, T. Fujita and J. Ichikawa, "High-speed optical FSK modulator for optical packet labeling, "OFC2004 PD16, Los Angeles, USA, 22-27 Feb-2004
- [2] K. Iwashita, T. Imai, T. Matsumoto, and G. Moto-sugi, "400Mbit/s optical FSK transmission experiment over 270km of single-mode fiber, "Electron Lett., vol.22, no-10, p.p. 164-165. 1986.
- [3] Z. Jianfeeng, C. Nan, P. V. Holm-Nielsen, C. Peucheret, P. Jeppesen, "An optical FSK transmitter based on an integratedDFB laser-EA modulator and its application in optical labeling," J EEPHOE OPT. COMM. EFF., Vol.15, 984-986 (2003)
- [4] E. N. Lalless, N. Skarmoutsos, D. Sywidis, "An optical FSK-based label coding technique for the realization of the all-optical label swapping "IEEE Photon. Tech. Lett., Vol.14, 1472-1474(2002)
- [5] T. Kawanishi, T. Sakamoto and M. Izutsu, "Ultra.-wide-band signal generation using high-speed optical frequency-shift-keying technique, "MWP2004, Ogunquit, Maine, USA, 4-6 Oct, 2004
- [6] S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou, N. Mitsugi, K. Kubodera, T. Kawanishi, and M. Izutsu, "LiNbO₃ Optical Single-Side Band Modulator, "OFC2000, PD-16
- [7] S. Shimotsu, S. Oikawa, T. Saitou, N. Mitsugi, K. Kubodera, T. Kawanishi, and M. Izutsu, "Single Side-Band Modulation Performance of a LiNbO₃ Integrated Modulator Consisting of Four-Phase Modulator Waveguides, "IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 13, 364-366 (2001)
- [8] K. Higuma, S. Oikawa, Y. Hahimoto, H. Nagata, and M. Izutsu, "X-cut lithium niobate optical single-side band modulator, "Electron. Lett., Vol. 37, 515-516 (2001)
- [9] T. Kawanishi, and M. Izutsu, "Linear single-side band modulation for high-SNR wavelength conversion, "IEEE Photon. Tech. Lett., Vol. 16, 1534-1536 (2004)