

### 3.4 GHz 帯集中定数型光変調器の開発

鳥羽 良和<sup>†a)</sup> 鬼澤 正俊<sup>†</sup> 生岩 量久<sup>††</sup> 山下 隆之<sup>†††b)</sup>  
 根岸 俊裕<sup>†††</sup> 村崎 出<sup>†††</sup>

#### Development of a Lumped Constant Type Optical Modulator in the 3.4 GHz Band

Yoshikazu TOBA<sup>†a)</sup>, Masatoshi ONIZAWA<sup>†</sup>, Kazuhisa HAEIWA<sup>††</sup>,  
 Takayuki YAMASHITA<sup>†††b)</sup>, Toshihiro NEGISHI<sup>†††</sup>, and Izuru MURASAKI<sup>†††</sup>

あらまし LiNbO<sub>3</sub> を用いた集中定数型 3.4 GHz 帯光変調器を開発した。本変調器は、UHF 帯で既に開発、実用化されているニオブ酸リチウム (LiNbO<sub>3</sub>) の電気光学効果を用いた LN 光変調器をもとに、大きさ、電極構造の工夫を行うことにより、3.4 GHz 帯の微弱な電波を感度良く受信できるようにしたものである。本変調器を使用すれば、中波ラジオ送信アンテナ等高電圧が印加されている個所に SHF 波受信アンテナの取付けが可能となる。また、導波管の代わりに光ファイバが使用でき、損失の低減等も図ることができる。

キーワード SHF, 光変調器, LiNbO<sub>3</sub>, レーザ, 集中定数型

#### 1. ま え が き

3.4 GHz 帯の微弱な電波で動作する集中定数型光変調器を開発した。本光変調器は、UHF 帯で既に開発、実用化されているニオブ酸リチウム (LiNbO<sub>3</sub>, 以下 LN という) の電気光学効果を用いた LN 光変調器 [1] ~ [4] をもとに、大きさ、電極構造の工夫を行うことにより、3.4 GHz 帯 (SHF 帯) の電波を感度良く受信できるようにしたものである。本変調器を使用すれば、中波ラジオ送信アンテナ等高電圧が印加されている個所等に SHF 波受信アンテナの取付けが可能となる。また、導波管の代わりに光ファイバが使用でき、損失の低減等も図ることができる。

#### 2. 目 標 仕 様

目標仕様を表 1 に示す。3.4 ~ 3.44 GHz の指定の 2 波 (音声プログラム伝送用: 帯域幅 400 kHz (FM 変調), 入力レベル 60±20 dBμV) を 45 dB 以上の C/N で伝送できる仕様で検討を行った。従来の UHF 波伝送用光変調器の上限周波数 (素子共振周波数) は素子容量の関係で 1 GHz 程度であり、3.4 GHz 帯を伝送するためには、共振周波数を 3 倍以上とする必要がある。また、変調信号、変調を受ける光が電極を伝搬、あるいは通過する時間によっても帯域制限を受けることも考慮し、変調電極長、電極分割数を決定する必要がある。

#### 3. LN 変調器の設計

変調周波数を考えれば進行波を利用できる分布定数型 [5] が有利であるが、今回は従来の集中定数型 UHF 帯用 LN 光変調器 [1] ~ [4] をベースに検討を行った。この理由は分布定数型の場合は感度向上のための共振回路が使用できないためである。集中定数型であっても素子容量、浮遊容量の低減等の低減を図り、3.4 GHz 帯において高い Q が実現できれば、45 dB 以上の C/N を確保することは可能であると判断した。

† NEC トーキン株式会社, つくば市  
 NEC Tokin Corporation, Tsukuba-shi, 305-0875 Japan

†† 広島市立大学情報科学部, 広島市  
 Hiroshima City University, Hiroshima-shi, 731-3194 Japan

††† NHK 技術局, 東京都  
 NHK Engineering Administration Department, Tokyo, 150-8001 Japan

a) E-mail: toba@nec-tokin.com

b) E-mail: Yamashita.t-0a@nhk.or.jp

表1 目標仕様  
Table 1 Specifications.

Items	Specifications	Remarks
Receiving frequency	2 carriers between 3.4GHz and 3.44GHz	FM waves for sound broadcasting
Input and output Frequency	50Ω	
RF input level	60±20dB μV	
RF output level	60±20dB μV	
Frequency response	1dB and less	
C/N	45dB and above	At a standard input level of 60dB μV with a bandwidth of 400kHz
Transmission distance	300m	
Ambient temperature	-10~45°C	

### 3.1 変調電極長

集中定数型 LN 光変調器の変調帯域は、(1) 変調信号の周波数が高いため、信号が電極に一樣に加わらないための影響、(2) 光波の電極通過時間（変調周波数が高いため、光波がデバイスを通する間にも変調電圧が時間的に変化してしまうための影響）、及び (3) 電極の CR 時定数（電極容量と回路抵抗によって決まる）等により制限される [6]。

まず、変調信号が電極に一樣に加わらないために決まる帯域 ( $\Delta f_m$ ) は電極長を  $E_l$ 、 $\epsilon_r$  を基板誘電率 (=35.5)、 $C$  を光速とすれば次式で表される [6]。

$$\Delta f_m = (4/\pi) \cdot (C/\sqrt{\epsilon_r + 1}) \cdot (1/E_l) \quad (1)$$

また、光波の通過時間によって決まる帯域 ( $\Delta f_o$ ) は、 $N_o$  を基板屈折率 (=2.145) とすれば、

$$\Delta f_o = (\sqrt{2}/\pi) \cdot (C/N_o) \cdot (1/E_l) \quad (2)$$

となる [6]。

電極の CR 時定数による帯域制限 ( $f_c$ ) は、次式で表される [6]。

$$\Delta f_c = (1/(\pi RC_m)) \cdot (1/E_l) \quad (3)$$

ここで、 $R$  は回路抵抗 (50Ω と仮定)、 $C_m$  (=0.64 pF) は単位長さ当りの電極容量である。

図1に式(1)~(3)により計算した電極長に対する変調帯域を示す。ここで  $C_m$  は、UHF 帯用に開発した4分割構造の単位長さ当りの電極容量 0.04 pF を採用した。

変調帯域は変調信号が電極に一樣に加わらないための影響、光波の通過時間によって制限され、変調帯域を 3.4GHz とした場合、 $E_l$  (電極長)  $\leq 17$  mm とする (従来の UHF 用は 25 mm)。

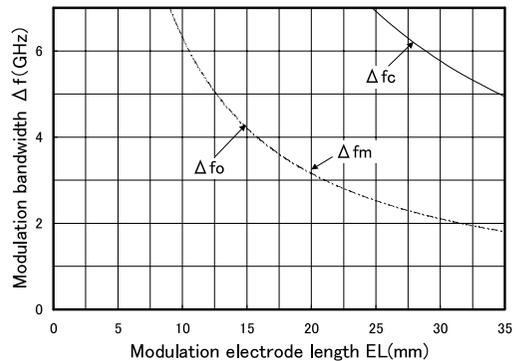


図1 電極長に対する変調帯域  
Fig. 1 Bandwidth in terms of the electrode length.

### 3.2 電極の形状

3.4 GHz 帯の信号を劣化なく伝送するもう一つの条件としては、光変調器の自己共振周波数が 3.4 GHz 以上であることが挙げられる。光変調器の自己共振周波数  $f_r$  は次式で求められる。

$$f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{\left(L_m \cdot \frac{C_m}{n^2}\right) E_l}} \quad (4)$$

$L_m$  (=0.91 nH) は変調電極の単位長さ当りのインダクタンス、 $n$  は分割数である。

図2に変調電極長を 17 mm とした場合の電極分割数 ( $n$ ) に対する自己共振周波数を示す。図2の結果より、電極分割数を9以上とすれば自己共振周波数を 3.4 GHz 以上とすることが期待できる。

しかしながら、浮遊容量等の影響により変調電極長を更に短くしなければならないことも十分考えられる。そこで、今回の設計においては、浮遊容量を考慮し、電極長を 10 mm、分割数を 10 (従来の UHF 用は電極

表 2 光変調器の諸特性  
Table 2 Characteristics of the optical modulator.

Samples	Light wave length(nm)	Insertion losses(dB)	extinction ratio(dB)	$V\pi$ (V)	$\Delta V/V\pi$ (%)	$C_m$ (pF)
1	1530	8.46	16	57	56.5	0.5
2	1530	7.02	34	59	27.3	0.5
3	1530	6.28	32	57	30.8	0.5

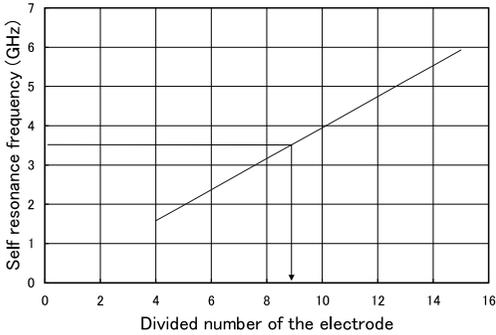


図 2 電極分割数に対する共振周波数

Fig. 2 Resonance frequency in terms of the divided number of the electrode.

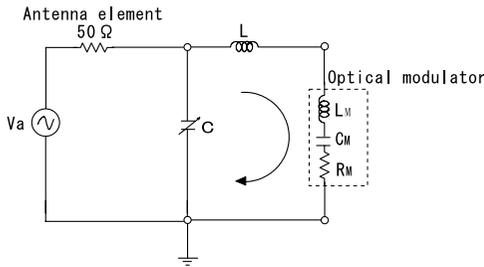


図 3 整合回路

Fig. 3 Matching circuit.

長 25 mm, 4 分割構造) とした。また, 共振による誘起電圧の向上を図るため, 変調電極の厚膜化 (10 μm) を図ることにより  $R_M$  の低減を行った。

図 3 に今回用いた LC 型の整合回路を示す。本回路は光変調器の電極容量及び付加コンデンサ (図 3 の  $C$ ) と配線インダクタンス ( $L$ ) を直列共振させ, 電極に加えられる 3.4 GHz 帯の電圧を高めるためのものである。付加コンデンサは, アンテナのインピーダンス (50 Ω) を低インピーダンスに変換し, 共振の  $Q$  を高める機能ももつ。

なお, 図 3 において  $R_M$  は 2 Ω,  $L_M$  は 9 nH,  $L$  は 10 nH 程度であり, 共振周波数の調整のため  $C$  は可変範囲 0.8 ~ 3 pF の可変コンデンサを用いた。

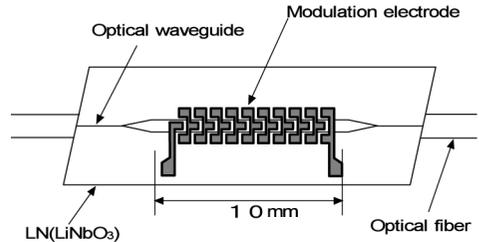


図 4 電極構造

Fig. 4 Structure of the electrode.

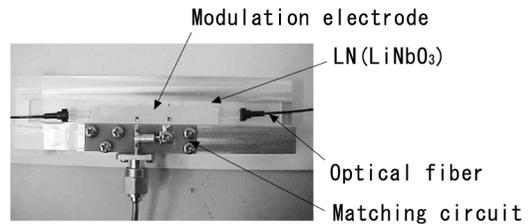


図 5 変調器の外観

Fig. 5 Outside view of the optical modulator.

#### 4. 光変調器の試作

以上の設計をもとに試作した光変調器の変調電極構造を図 4 に示す。光波長については, 従来 1.3 μm 帯を使用してきたが, 装置価格を抑えるため, 光通信で汎用的に使用されている 1.5 μm 帯とし, 光導波路幅 (1.18 (=1.31/1.55) 倍: 7 μm) 及び分岐結合部形状の最適化を図り試作を行った。

表 2 に今回試作した光変調器 (サンプル数: 3) の諸特性を示す。光波長 1530 nm における挿入損は約 6 ~ 8 dB, 消光比 (光信号振幅の最大値に対する消光時の最少振幅値の比) は約 30 dB, 半波長電圧は約 60 V, 電極容量は 0.5 pF であり, 設計値をほぼ満足する結果が得られている。図 5 は光変調器の外観である。

#### 5. システム系統

図 6 に本光変調器を用いたシステム系統を示す。SHF 帯ヘッドアンプと共振周波数を 3.4 GHz に調整した光

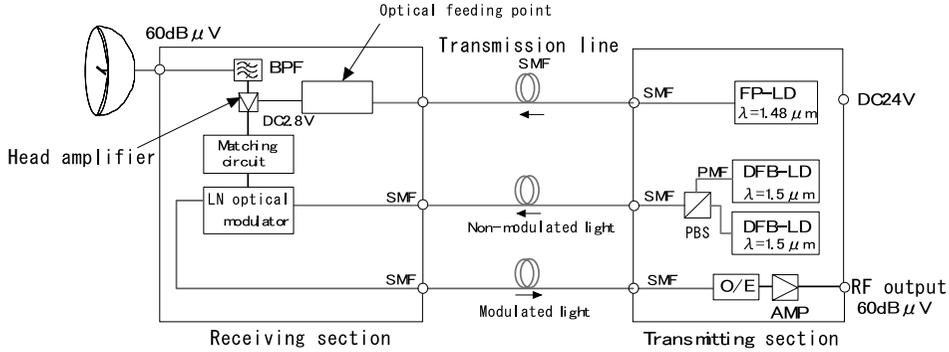


図6 システムの系統  
Fig. 6 System configuration.

表3 光発電素子の変換効率

Table 3 Conversion efficiency of electric power generating devices.

Light wavelength(nm)	Material	Conversion efficiency(%)
1300~1500	InP	20
750~ 850	GaAs	40

変調器を組み合わせて性能評価を行った。本システムは地上波デジタル放送用無給電光伝送装置 [4] と同様、変調度を高めるため、光給電型ヘッドアンプを利用した系統としている。

前記地上波デジタル用では、半導体励起固体レーザー (波長 1.34 μm, 出力 200 mW) を用い、その一部を光カプラにより光発電素子へ分配入力し、電力生成を行っていた。しかし、今回のアプリケーションについては、実用化時の装置コストを低減するため 3 レーザ方式とした。

すなわち、光変調用として 1.5 μm 帯 DFB-LD、光エネルギーを電力に変換する光給電用については、光アンプ等で使用されている 1.48 μm FP-LD を用いて構成した。当初は表 3 に示すように変換効率が高い短波長帯 (750 ~ 850 nm) を用いる予定であったが、汎用性を優先した。

光変調用光源については LN 光変調器の偏光依存性を解消するため、直線偏光の 2 台のレーザーを直交合成して送出する方式を採用した。

ヘッドアンプとしては SHF 帯をカバーでき、低電力でかつ低ノイズ、高利得のものが必要である。このため、増幅素子として NF 2.0 dB, 利得 20 dB(Typical), 消費電力 33 mW の GaAs FET を選定した。例えば、33 mW の電力を光給電方式により得るためには、光

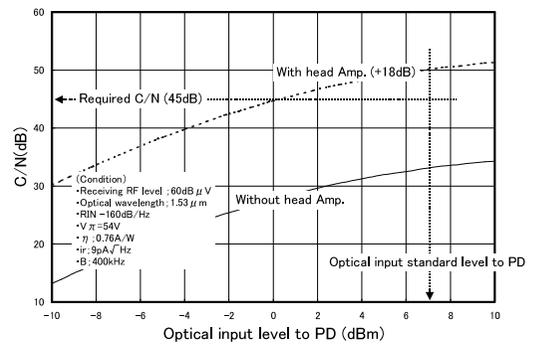


図7 PD入力レベルに対する C/N  
Fig. 7 C/N in terms of the PD input level.

発電素子の変換効率、動作点、温度特性、光ファイバの伝送損を考慮すると約 350 mW の光を発振させればよいことになる。システムのヘッドアンプ付き C/N は以下の式で求められる [2]。

$$C/N \cong 10 \log \{ (i_p^2 (\pi G Q V_s / 2 V_\pi)^2 / 2) * 50 / (i_p^2 RIN + 2e i_p + i_r^2) \} (1/B) * 50 \quad (5)$$

ここで、 $i_p$  : 光電流、 $G$  : ヘッドアンプの電圧利得、 $Q$  : 整合回路の電圧利得、 $V_s$  : システムの入力電圧、 $V_\pi$  : 半波長電圧、 $RIN$  : 相対雑音強度、 $i_r$  : 等価雑音電流、 $B$  : 帯域幅である。

式 (5) に基づき、入力電圧 ( $V_s$ ) 60 dBμV 入力における PD 光入力レベルに対する C/N 計算値を図 7 に示す。

ここでは電極容量の浮遊容量等を考慮し、整合回路の  $Q=7.5$ 、 $V_s=60 \mu V$ 、 $G=18 \text{ dB}$  (電力利得)、 $V_\pi=54 \text{ V}$ 、 $RIN=-160 \text{ dB/Hz}$ 、 $i_p=3.8 \text{ mA}$ 、 $i_r=9 \text{ pA}/\sqrt{\text{Hz}}$ 、 $B=400 \text{ kHz}$  とした。ヘッドアンプを

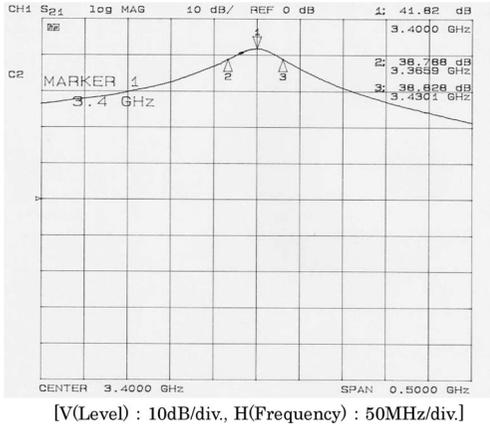


図8 周波数特性  
 Fig.8 Frequency response.

使用した場合は、 $C/N=50$  dB以上が期待できる。なお、ヘッドアンプなしの場合のデータについては $G=1$ としている。

## 6. 評価結果

以下の評価結果については表2に示すサンプル2の光変調器を使用している。

### (1) 周波数特性

図8に共振周波数を3.4 GHzに調整した場合の周波数特性を示す。縦軸は利得 (10 dB/div.)、横軸は周波数 (50 MHz/div.)である。3 dB帯域幅は約64.2 MHzとなっており、整合回路の $Q$ は約53 ( $=3.4 \text{ GHz}/64.2 \text{ MHz}$ )である。ここで、測定条件は、システムの受信部入力レベル $-30 \text{ dBm}$ 、光源 (DFB-LD) 波長1535 nm、光源出力40 mW (単体)、変調器損7.02 dB、O/E入力レベル2.8 dBm、ヘッドアンプゲイン22.6 dB、NF 2 dBである。またO/E部 (フォトダイオード+増幅器)の受光感度は、0.76 A/W、増幅器利得は40 dBである。

### (2) システムの $C/N$ 特性

図9に $C/N$ 特性 (縦軸: 10 dB/div., 横軸: 10 MHz/div.)を示す。トータル $C/N$ として計算結果より+11.3 dB高い61.8 dBが得られた。これは整合回路等の浮遊容量を極めて小さく抑えることができ、図7に示すように3.4 GHz帯で高い $Q$  (約53)が実現できたこと、ヘッドアンプゲインが高くとれたことによるものと考察される。ここで、測定条件は (1) 項と同様である。

### (3) LN 光変調器単体の $C/N$ 特性

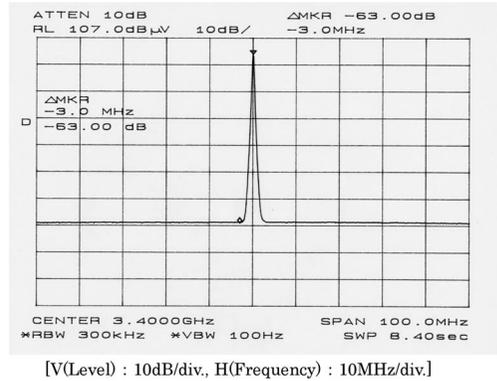


図9 システムの $C/N$   
 Fig.9  $C/N$  of the system.

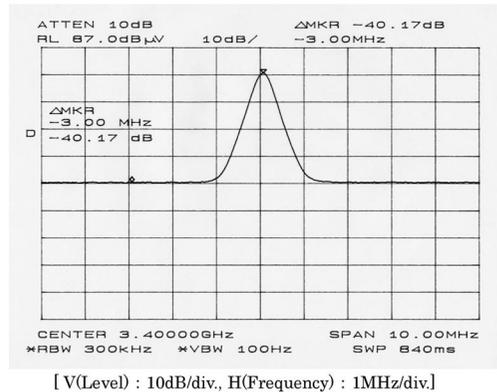


図10 光変調器単体の $C/N$   
 Fig.10  $C/N$  of the optical modulator.

光変調器単体 (図6においてヘッドアンプなし) では図10に示すように約40 dBの $C/N$ が得られた。ここで、測定条件は (2) 項と同様である。

## 7. むすび

LiNbO<sub>3</sub>を用いた集中定数型3.4 GHz帯光変調器を試作し、3.4 GHz帯において極めて高い $Q$ を実現することにより、目標性能を十分満足する性能を得ることができた。今後は高電圧が印加されている個所に設置できるシステムを試作し、システムとしての性能の確認、検証を行ってきたい。

また、今回の試作結果から共振周波数を更に高められる可能性も出てきたため、更なる高周波化についても検討を行う予定である。

## 文 献

- [1] 生岩量久, 中 尚, 鳥羽良和, 戸叶祐一, 佐藤由郎, “導波

路型光変調器を用いたテレビ電波受信システム,” 信学論 (C-I), vol.J79-C-I, no.7, pp.249-255, July 1996.

- [2] 生岩量久, 竹内安弘, 鳥羽良和, 鳥畑成典, 谷沢 亨, 尾崎泰巳, “地上デジタルテレビ信号伝送用光伝送システムの開発,” 信学論 (C), vol.J84-C, no.8, pp.666-672, Aug. 2001.
- [3] 生岩量久, 竹内安弘, 秋山一浩, 山下隆之, 鳥羽良和, 鬼澤正俊, 鳥畑成典, “偏光無依存光変調方式を用いた地上デジタル波受信装置の開発,” 映像情報メディア学会, vol.56, no.2, pp.212-217, Feb. 2002.
- [4] 生岩量久, 山下隆之, 鳥羽良和, 鳥畑成典, 谷沢 亨, 尾崎泰巳, “地上デジタルテレビ波伝送用光伝送システムの高感度化の検討,” 信学論 (C), vol.J85-C, no.12, pp.1184-1191, Dec. 2002.
- [5] 斉藤富士郎, 超高速光デバイス, 共立出版, 1998.
- [6] 末田 正, 神谷武志, 超高速光エレクトロニクス, 培風館, 1991.

(平成 16 年 3 月 19 日受付, 4 月 30 日再受付)



根岸 俊裕

1997 慶応大大学院理工学研究科 (電気工学) 了。同年, NHK 入局。2000 より, 同技術局送信技術センター。主として放送網設備及び監視システムの設計, 開発業務に従事。



村崎 出

1989 徳島大・工・電子卒。同年, NHK 高松放送局入局。その後, 技術局送信技術センターにて主に送受信装置の整備・開発業務に従事。2004 年 6 月より NHK 大阪放送局技術部・チーフエンジニア。



鳥羽 良和 (正員)

1988 東邦大・理・物理卒。同年, 東北金属工業 (現 NEC トーキン (株)) 入社。以降, 光デバイス及び, 光中継装置の研究開発に従事。現在, ブロードバンドデバイス事業推進部開発部マネジャー。



鬼澤 正俊

2000 電通大・電気通信・電子卒。同年, (株) トーキン (現 NEC トーキン (株)) 入社。以降, 光中継装置の研究開発に従事。現在, ブロードバンドデバイス事業推進部。



生岩 量久 (正員:フェロー)

1970 徳島大・工・電気卒。同年, NHK 入局。主として送信装置の設計, 開発業務に従事。2004 年 7 月より, 広島市立大学情報科学部教授。工博。



山下 隆之

1994 熊本電波高等専門学校電子工学卒。同年, NHK 入局。福岡放送局, 宮崎放送局に勤務。2000 より, 技術局送信技術センターに勤務し, 現在に至る。主として空中線の設計, 整備に従事。