

## AM 送信機（一象限変調）

勝部 雅稔（コンサルティング・エンジニア）

ビジネス・フィールド:

- 半導体の品質問題解決支援サービス
- 電子回路設計

自著:

題名: オペアンプ スペックと活用

本書は、オペアンプのスペックと、その測定方法や活用方法を示しています。本書が扱うスペックの範囲は、直流/交流/雑音です。「スペックの活用」には、応用回路上で発生する誤差計算方法が挙げられます。また本書では、理想モデルからは正確な計算が難しい場合の計算方法や測定方法を提案しています。「ノウハウ」とも言い得ます。本文は452ページです。

連絡先:

名前: 勝部 雅稔（かつべ まさとし）

所在地: 〒215-0017 神奈川県 川崎市 麻生区 王禅寺西5-3-5-302

e-mail: [mkatsube@juno.dti.ne.jp](mailto:mkatsube@juno.dti.ne.jp)

ホームページ: <http://www.juno.dti.ne.jp/~mkatsube/Home.html>

AM 送信機とは、いわゆる「AM ラジオ」で受信できる送信機のことです。日本国内では免許不要の小電力送信機を、特に「ワイヤレスマイク」と呼んでいます。英語圏では、Radio Transmitter（無線送信機）と、ストレートに呼ばれることが多いようです。本資料では、「送信機」とします。

最初に法律面からの注意ですが、免許不要であるか否かは、「電波の強さ（電界強度）」によって決まります。電波の強さは、送信機だけではなくアンテナの性能も大きく影響します。ですから、同じ送信機であっても高性能なアンテナを取り付けると違法無線設備になります。電波の発信場所は、三点法などで特定できますから、違法電波の送信はやめましょう。

ここで紹介する送信機は、「部屋の中で届く」程度です。

ここで紹介する AM 送信機は、理論的にスマートで、部品点数が少なく、誰でも作れるものを目指します。題目の「一象限変調」は、私がその理論背景から作った造語です。この方法では、低電源電圧・低消費電力で、電源電圧変化に強く、少ない部品で高精度の変調ができ、手軽に高音質が実現できます。

アンティーク・ラジオでお気に入りの音楽を流したり、ラジオ好きのご家族への手作りプレゼントにしてもよいと思います。

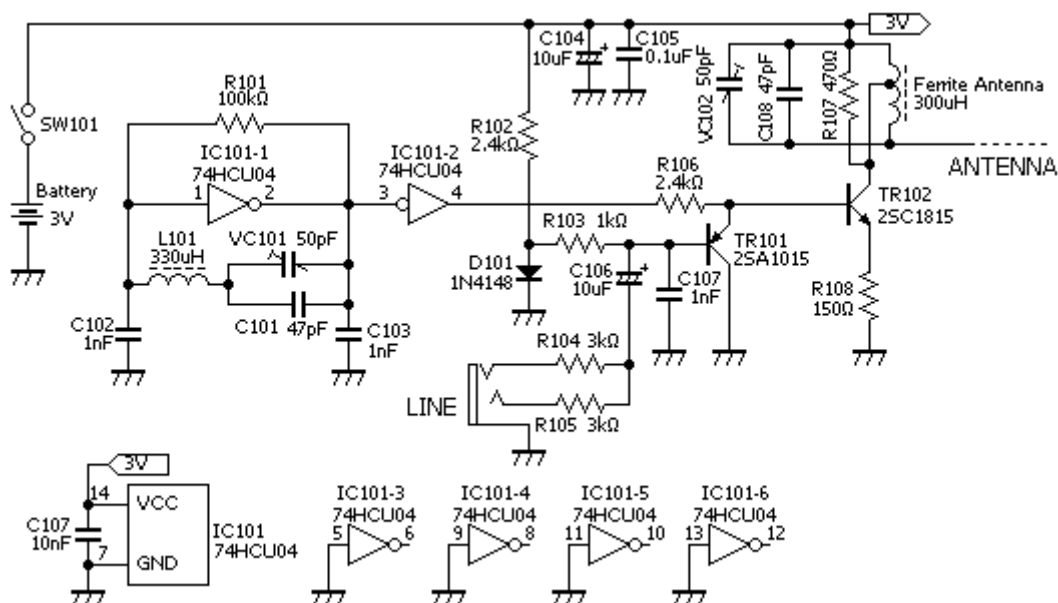


図1 AM 送信機全回路図

## 動作原理

図1が、ここで紹介するAM 送信機的全回路図です。入力、CD プレイヤーなどの LINE 出力を想定しています。マイクアンプを取り付ければ、音声の送信もできます。僅か 3[V]の低電圧で、100[%]変調が可能です。電源電圧は 2[V]程度まで動作し、電源電流は 5[mA]程度です。

図1の動作を説明します。

IC101-1 とその周辺回路は、クラップ発振回路です。電源電圧変化に伴う反転増幅器(この場合、IC101-1) 定数変化に起因した発振周波数変動の低減に優れます。

発振周波数変動の低減が実現できるメカニズムは、次の通りです。発振周波数変動のメカニズムは、電源電圧変化に伴う反転増幅器の入出力静電容量変化です。クラップ発振回路では、反転増幅器の入出力静電容量に並列接続される形で C102, C103 が取り付けられています。C102, C103 は、トランジスタの入出力静電容量変化に対して十分大きく設定できます。すると、合計の静電容量は、並列接続ですから静電容量の大きな C102, C103 が支配的となり、トランジスタの入出力静電容量変化が現れ難いというわけです。

発振周波数  $f$  は、次式で計算できます。

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L101} \times \left( \frac{1}{C101 + VC101} + \frac{1}{C102} + \frac{1}{C103} \right)} \quad (1)$$

C102, C103 は、帰還量を決定します。クラップ発振回路は、多くの電子回路などの専門書籍に書かれていますので、詳しくはそちらをご覧ください。

ここではクラップ発振回路に、Unbuffered タイプの 74HCU04 を使っています。IC101-1 の採用理由は、部品点数とコストが低減できるからです。当初、図2のトランジスタ発振回路を使っていたが、チョークコイルなど部品点数の増加と、やや高価であるために変更しました。

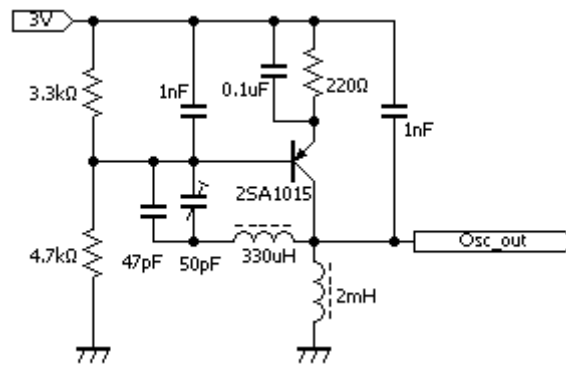


図2 トランジスタ・クラップ発振回路

IC101-2 の発振出力は、R106 を通じて TR101 エミッタと TR102 ベースの接続点に供給されます。TR101 ベースは、D101 により 0.6[V] 程度にバイアスされ、そこへ LINE から音声電圧が重畳します。TR101 エミッタは、ベースよりも常に 0.6[V] 程度高い電位になります。この TR101 エミッタは IC101-2 からの方波電圧が R106 を通じて供給されますから、音声電圧で方波電圧が振幅変調されることになります。

図3は、この様子を測定したものです。LINE 入力に 1[kHz] の三角波を与えて、TR101 のエミッタ電圧を測定しています。IC101-2 出力は 1[MHz] の方波電圧ですが、振幅変調されている様子がわかります。また LINE 入力が三角波ですから、振幅変調波の直線性が良好であることも理解できます。LINE 信号の振幅は、2[Vp-p] として設計しています。

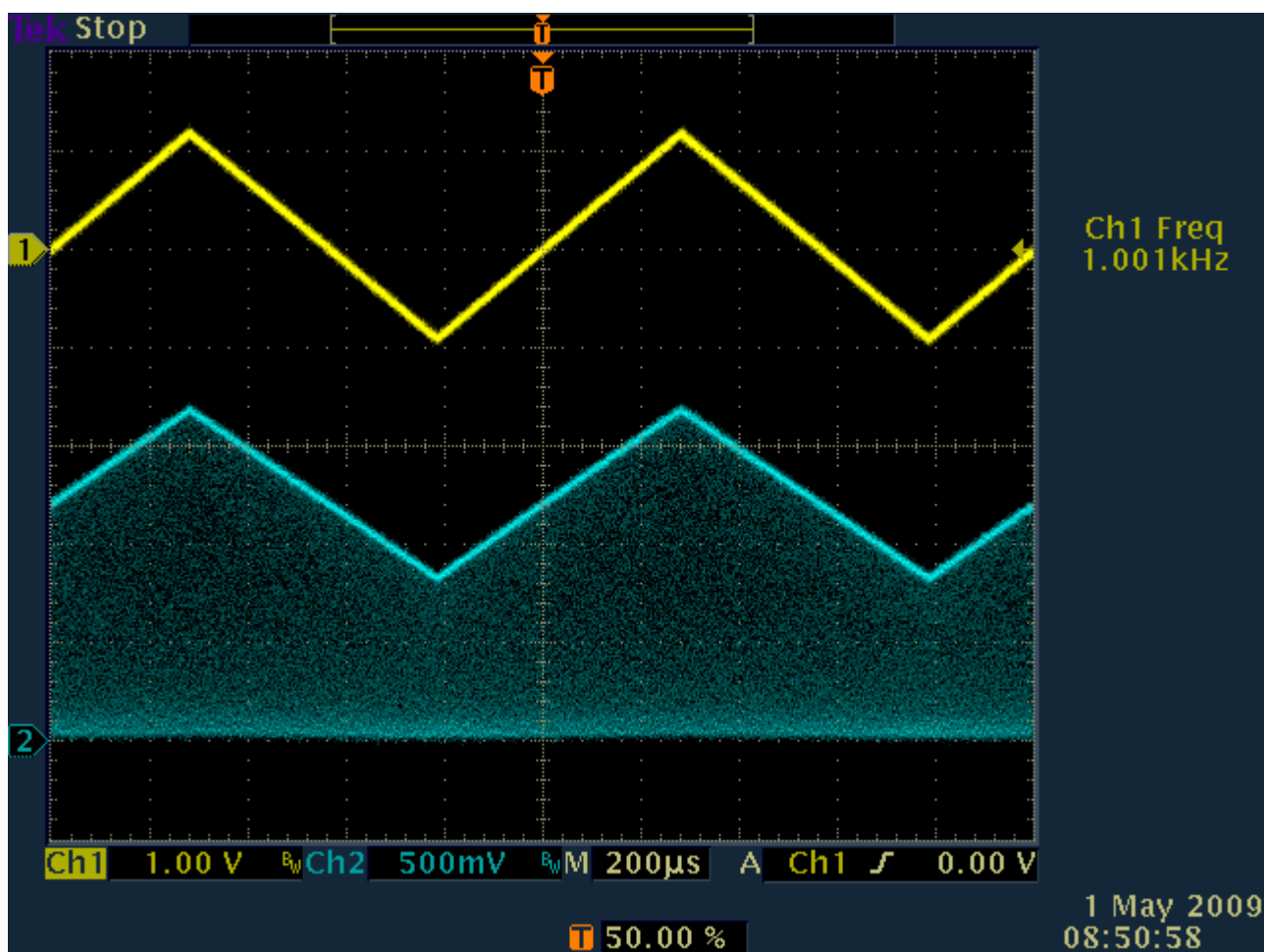


図3 LINE 入力電圧(上)とTR101 エミッタ電圧(下)

TR101 エミッタ電圧は、TR102 ベース電圧でもあります。TR102 エミッタ電圧は、そのベース電圧よりも 0.6[V]程度低い電圧になります。つまり、TR102 エミッタ電圧は、TR101 ベース電圧と同電位になるわけです。両者の違いは、TR101 は直流+LINE 入力ですが、TR102 エミッタは IC101-2 の発振出力の振幅変調信号になることです。

図4は、LINE 入力と TR102 エミッタ電圧です。

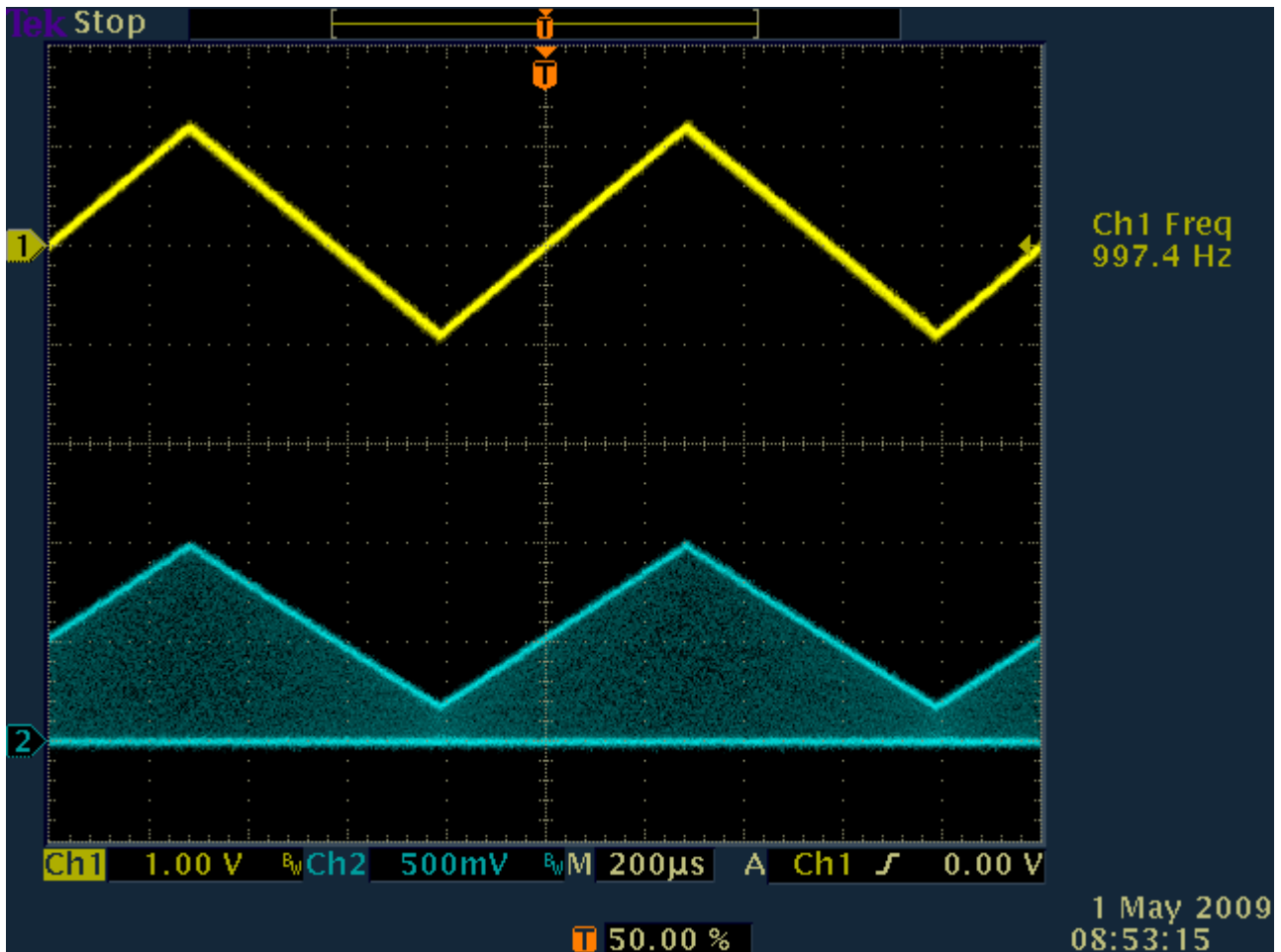


図4 LINE 入力(上)と TR102 エミッタ(下)

図4の TR102 エミッタ電圧と、図3の TR101 エミッタ電圧を比較して、0.6[V]のレベルシフトになっていることがわかります。また、TR103 エミッタにおいても良好な直線性が保存されていることが読み取れます。

この動作メカニズムは、電源電圧変化に対する送信電力の安定化に有効です。なぜなら、送信電力は、図1の D101 の電圧と R108 によって決まるためです。

TR102 エミッタで、1[MHz]の方形波が振幅変調されている様子を図5に示します。

この TR102 エミッタ電圧は、R108 (150[Ω]) の両端電圧であり、電流に変換されます。この電流はコレクタ電流として、図1の VC102||C108 とバーアンテナ (Ferrite Antenna) の共振回路に通じます。

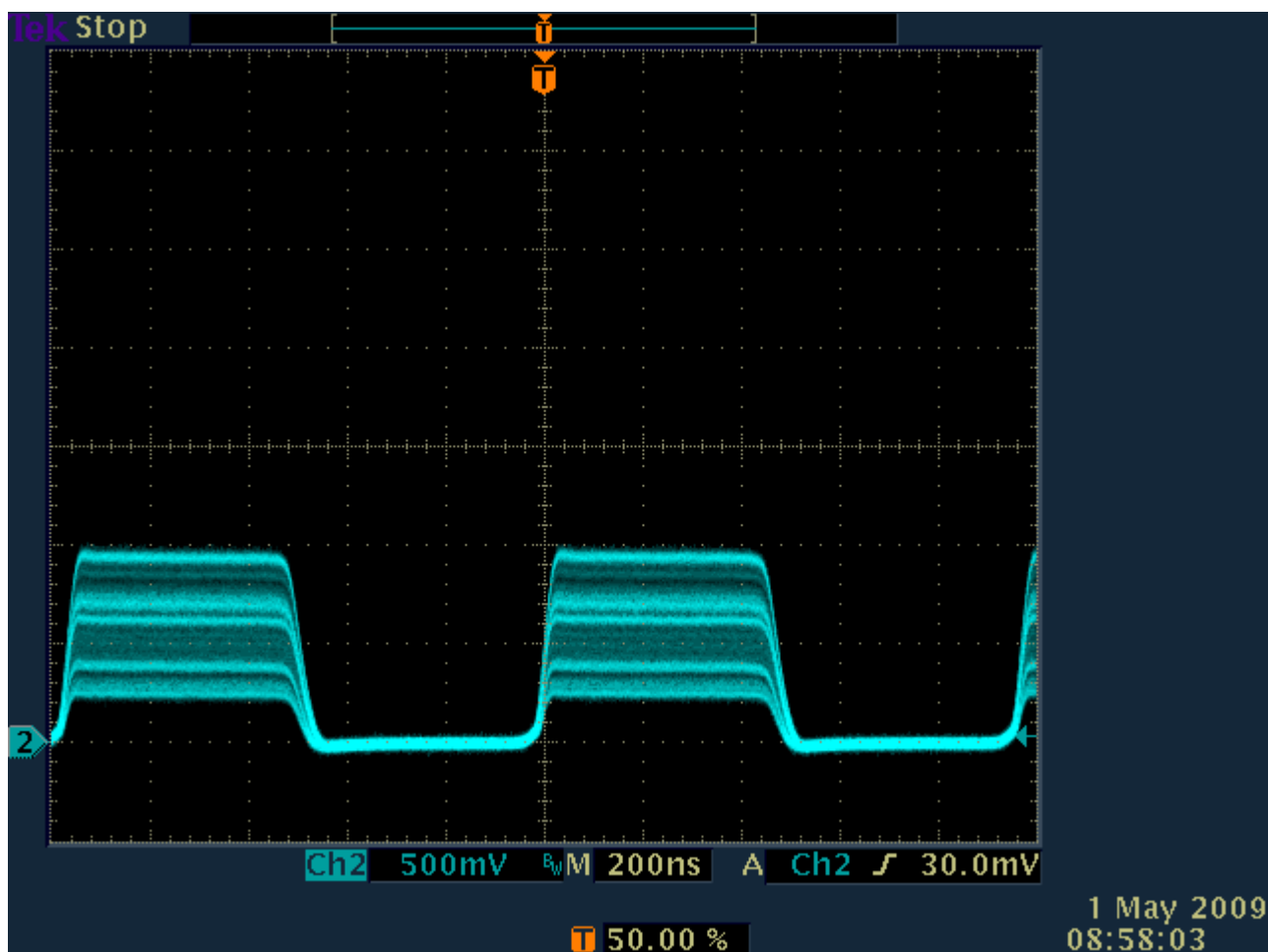


図5 TR102 エミッタ(三角波による振幅変調波)

共振回路は、はずみ車(flywheel)のような動作をします。はずみ車を回転させると、しばらく回転を続け、やがて止まります。同様に共振回路にステップ入力を与えると、しばらく共振周波数の収束振動を生じます。これをフライホイール効果(flywheel effect)と呼びます。共振回路のQが高いほど、抵抗により失われるエネルギーが少なく、収束振動が長く続きます。この送信機では、フライホイール効果を利用します。

IC101-2 出力とTR102 コレクタ(共振回路)の波形(音声入力なし)を、図6に示します。

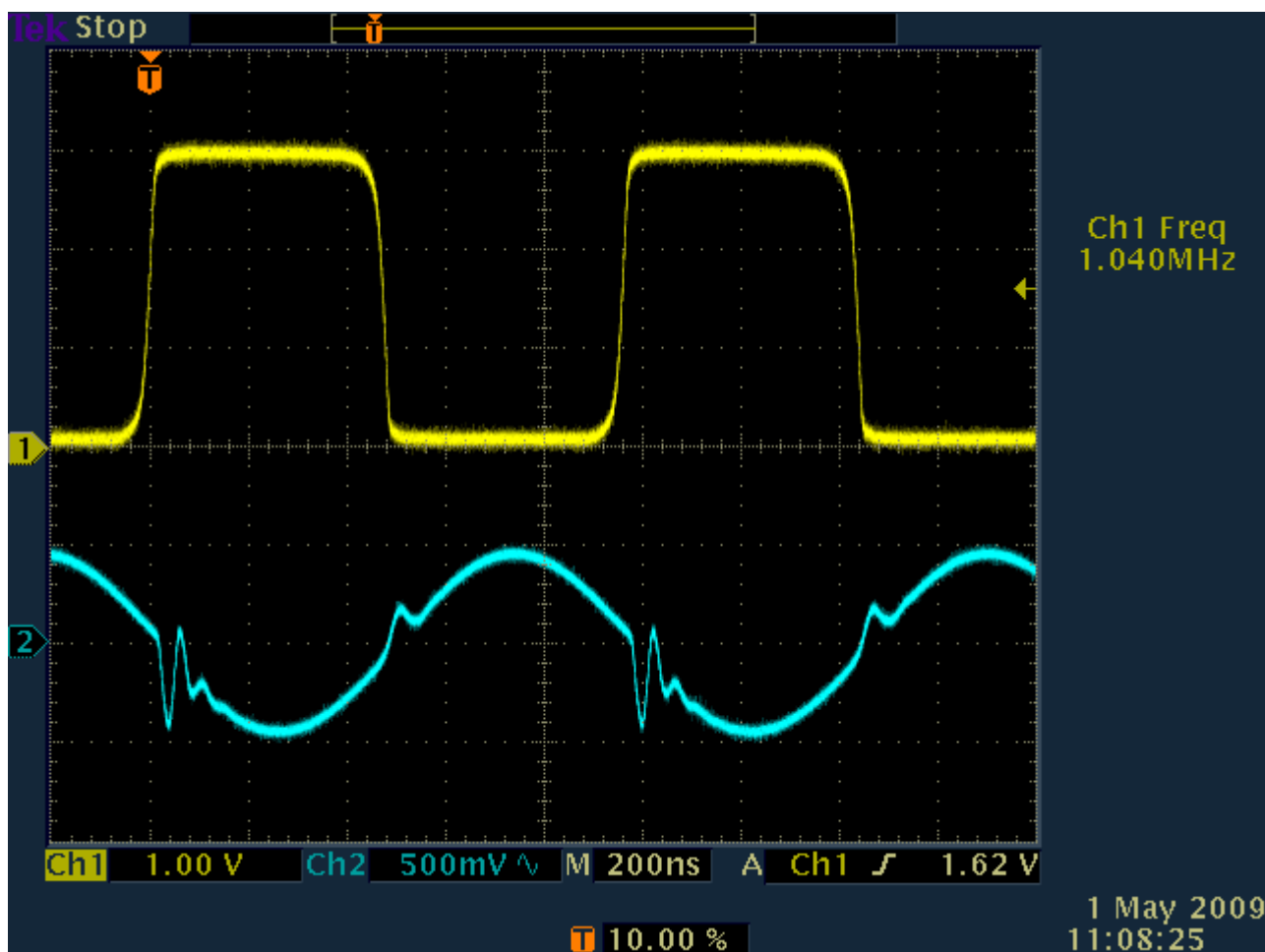


図6 IC101-2 出力(上)とTR102 コレクタ(下)

図6で、IC101-2 出力がLレベル( $\sim 0[V]$ )のとき共振回路への電流は断たれていますが、フライホイール効果により生成されている様子がわかります。

共振回路の波形(図6下側)には、スイッチング電流によるスパイクが見られます。このスパイクを持つ搬送波が、そのまま電波になるわけではありません。しかしこのスパイクも搬送波周波数の繰り返し信号ですから、小振幅の信号として残ります。変調度が100[%]に近づくと、振幅の小さな部分に影響が現れます。しかし、市販の音楽CDを楽しむ範囲であれば、平均的な変調度は30[%]程度になると思いますので、問題ありません。

図4の片側だけを振幅変調した電流を共振回路に与えると、同様にフライホイール効果が生じます。結果として、共振回路(TR103 コレクタ)には図7のような正負対称に振幅変調された波形が現れます。

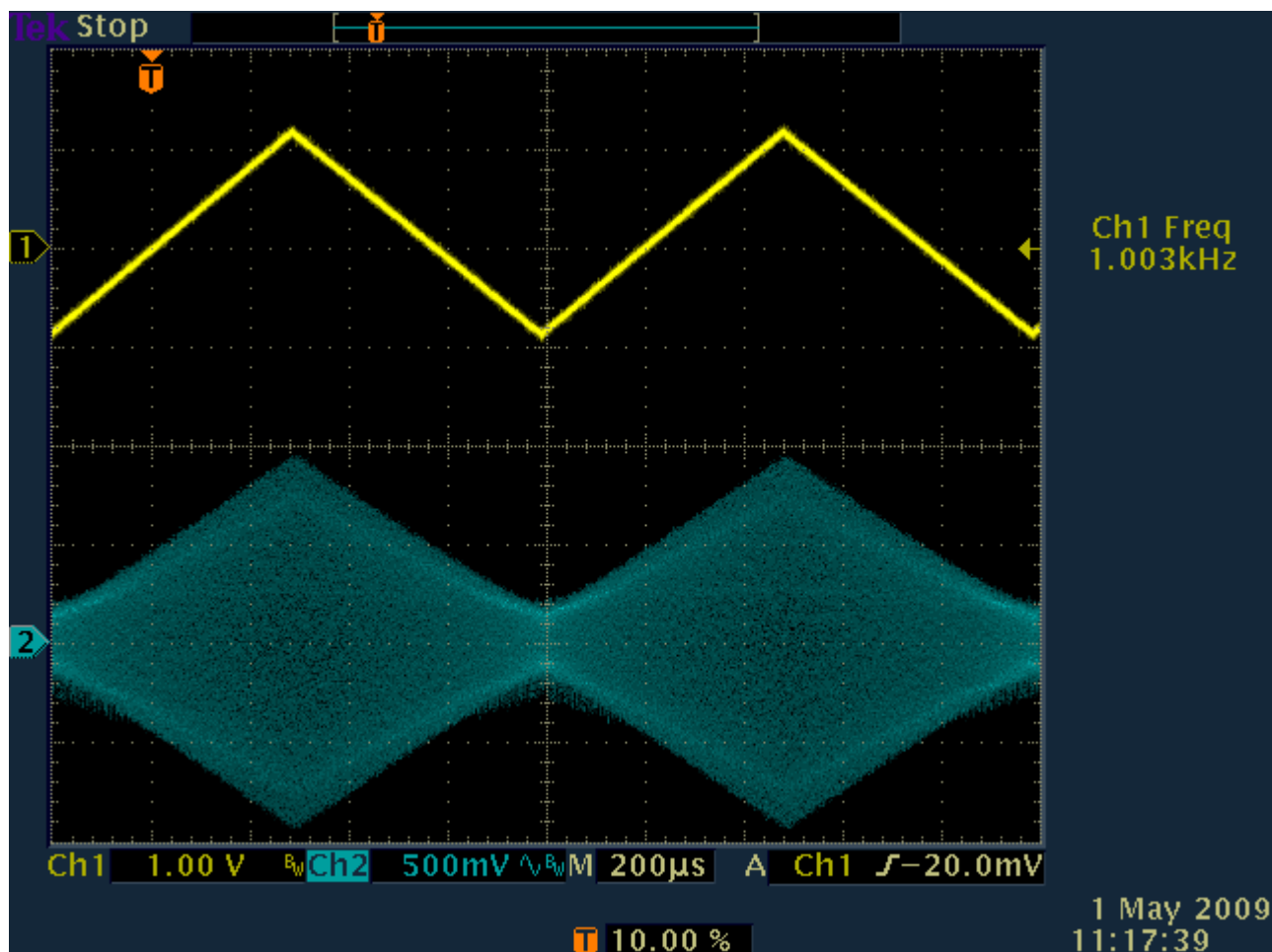


図7 LINE 入力(上)とTR102 コレクタ(下)

これで、AM 波のでき上がりです！

振幅変調波(下)の谷の部分が見えにくい印象を受けますが、これは図6のスパイクであり、スパイクを除いてみればきれいな三角波になっています。またこの波形は、+3[V]の直流電圧に重畳しています。

このフライホイール効果を用いる方法は、AM の変調方式のうち「大電力変調」で利用されています。共振回路を用いる方法では、電力利用効率を高めることができます。全波の信号処理であれば増幅器の振幅範囲で全波を扱うことになりますが、半波であれば増幅器の振幅範囲をフルに半波だけに利用できるわけです。今回の AM 送信機は、3[V]の低電源電圧を特長にしていますから、増幅器の扱える電圧振幅範囲は狭くなります。このことから、できる限り電力利用効率を高める必要があったものです。



## 性能評価結果

次に方形波応答と周波数特性を評価しましたので、結果を載せておきます。

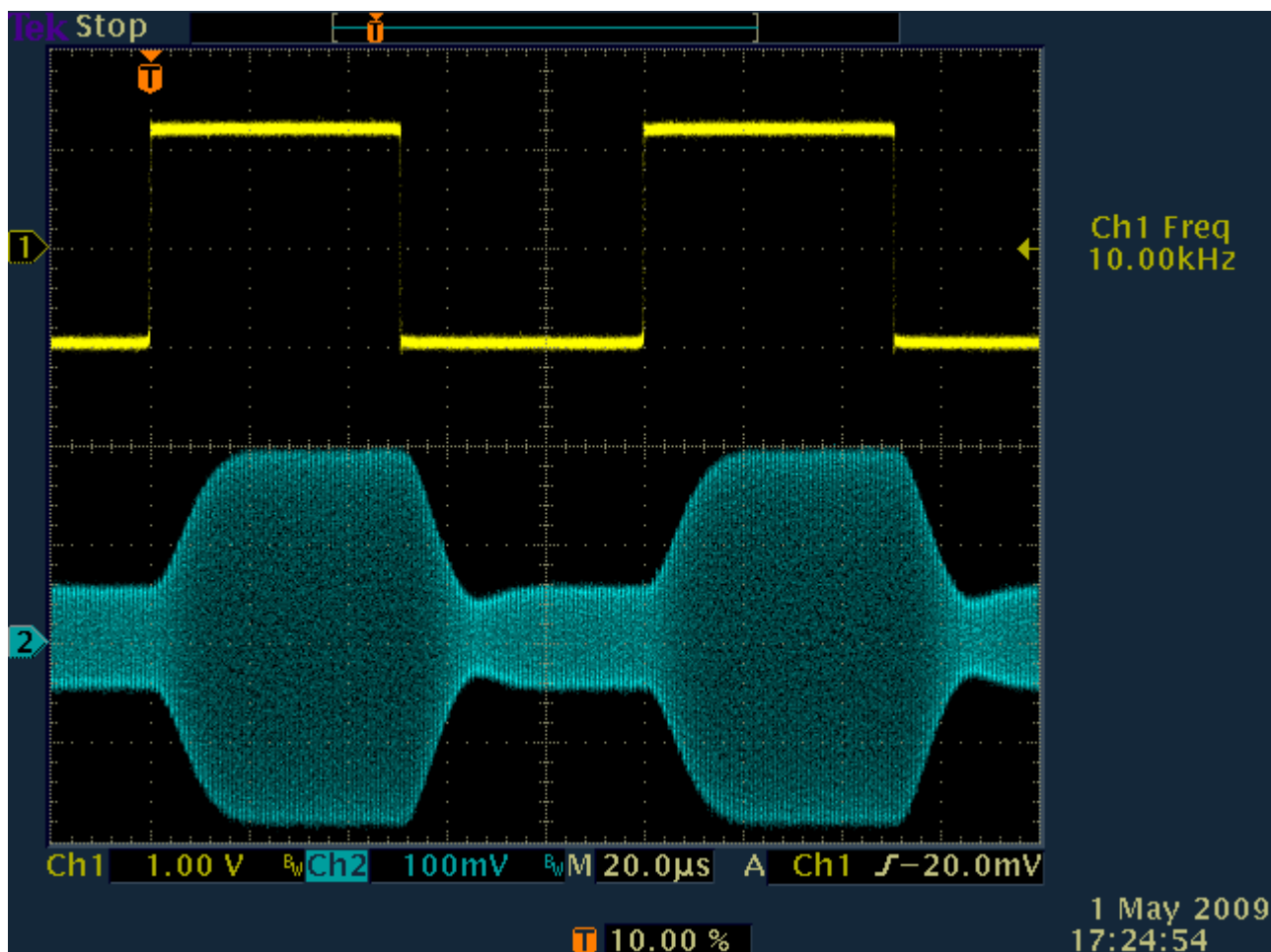


図8 方形波応答

AMラジオの占有周波数帯域幅は、15[kHz]です。半分の7.5[kHz]が最高変調周波数ということになります。手元の短波ラジオは、6[kHz]程度から急峻な減衰特性を持っていました。おそらく、中間周波フィルターの特性であろうと思います。

ここでは、その周波数を超える10[kHz]の方形波で評価しています。音声信号変調であれば、十分な速度を有していることがわかります。

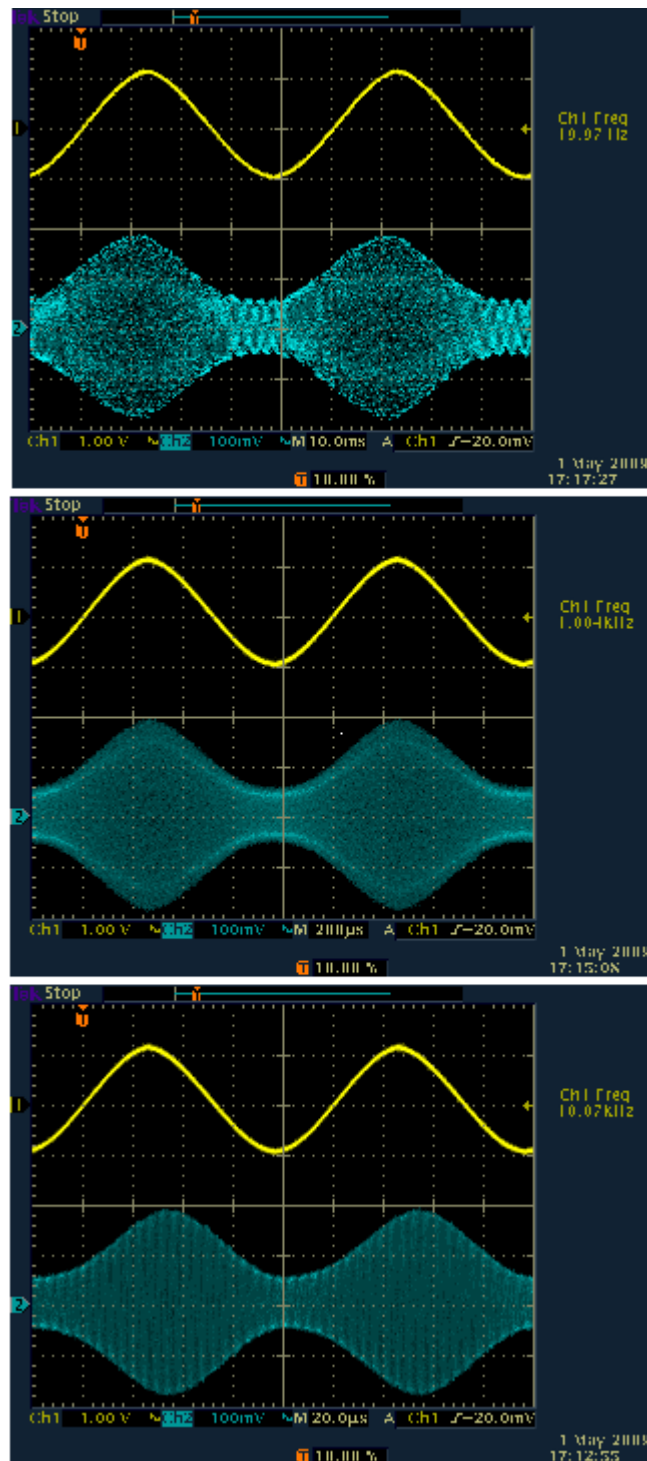


図9 周波数応答 20Hz(上), 1kHz(中), 10kHz(下)

図9は、正弦波による評価結果です。下側の波形の色のトーンが異なっていますが、デジタル・オシロスコープのエリアシング(折り返し雑音)に起因しています。音声周波数によって、搬送周波数に歪が発生しているわけではありません。

図9から、LINE 入力(上)と変調波(下)の比較から、周波数による振幅が一定であることと、位相にほとんど変化が無いことが読み取れます。これから、高音質が期待できるわけです。

## アプリケーション

国内向けのAMラジオは、国によって周波数が異なります。赤道に近い地域では、空電が激しく低い周波数が使えないことから、2~3[MHz]が使われています。ロシアでは200[kHz]が使われています。

この送信機の基本回路で問題になりそうなのが、発振回路です。そこでIC101に使用した74HCU04で、10[MHz]の発振が可能かどうかを評価しました。結果は、問題なく発振しました。しかし、僅かに高めの電源電圧が必要で、2.1[V]以下では発振が停止しました。

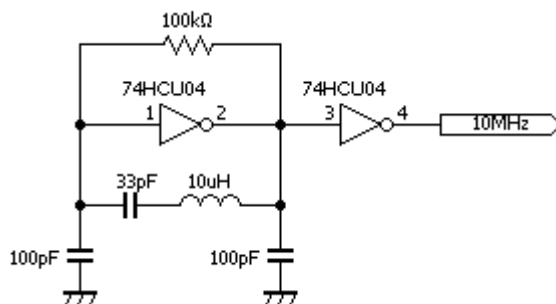


図10 10[MHz]発振回路

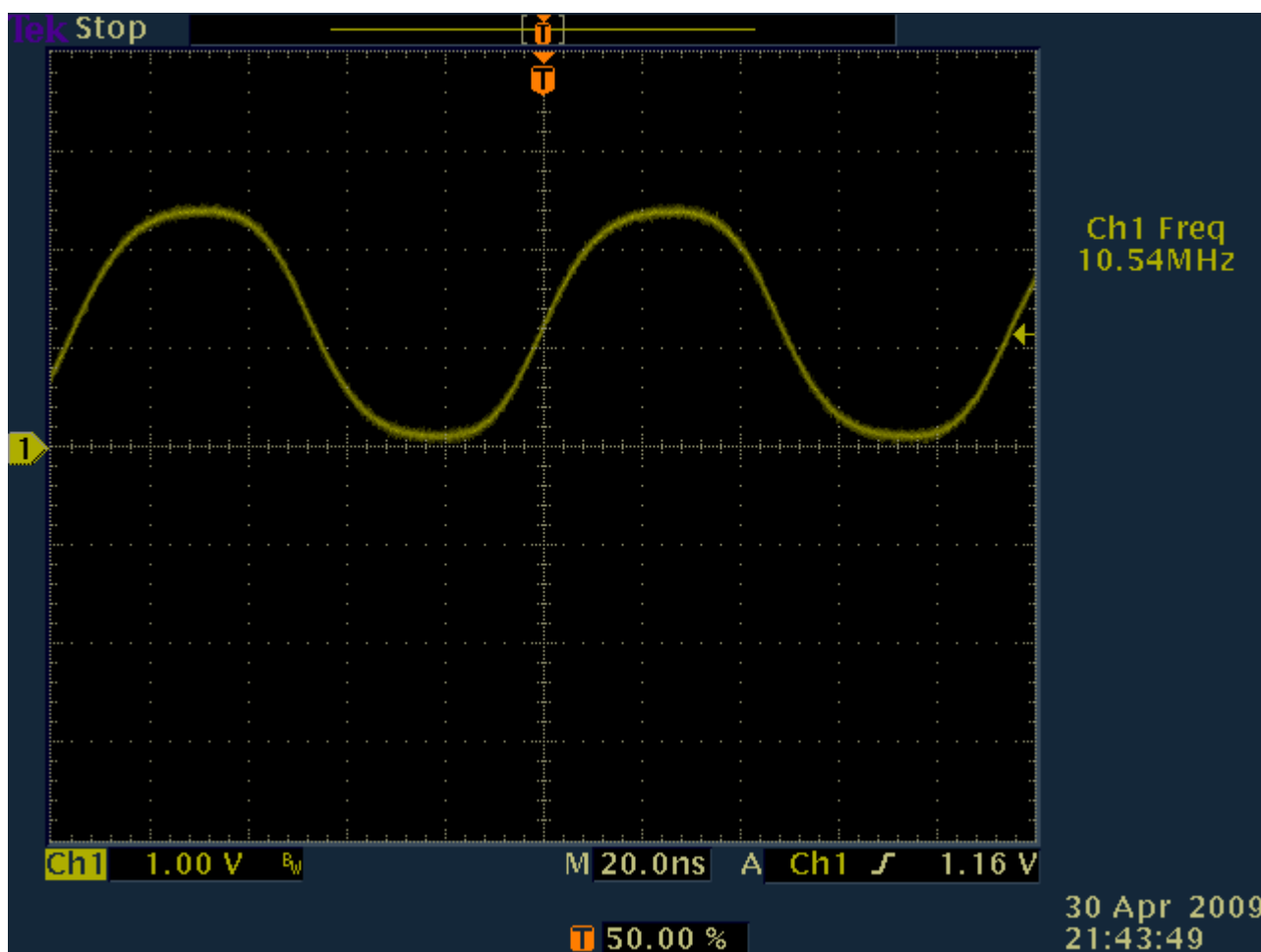


図11 10[MHz]発振波形

今回は回路を極力簡素化しましたが誤差低減の回路を追加すれば、直線性のよさと直流変調ができること、および計算に乗ることから計測分野にも応用できると思います。

電源電圧範囲が2[V]程度まで動作します。多くの機器が、電池1個当たり1.2[V]程度で動作しなくなるようですから、他の機器で使えなくなった電池でもしばらく動作すると思います。また電源電圧変化に対する周波数も、再調整が不要なほど安定です。新品のアルカリ電池であれば、1日数時間で毎日使っても半年以上使えるでしょう。

音質が悪いと感じる場合は、ラジオまたはAM送信機の位置を調整してみてください。

## なぜ、「一象限変調」と呼べるのか？

ここで言う「一象限」とは、座標平面のそれで、四象限のうち右上の象限のことです。反時計回りに、二・三・四象限の順です。

現在市販されている送信機の振幅変調 (Amplitude Modulation) は、大きく「大電力変調」と「小電力変調」に分けられます (アナログ信号処理による変調に限定)。ここで紹介した変調方式は、小電力変調に該当します。

実際の送信機の小電力変調では、例えば「ギルバート・セル」と呼ばれる四象限乗算器によって生成されています。四象限とは、搬送波  $C$  と、ベースバンド  $B$  (音声通信では「音声信号」のことです) の極性によって、変調波  $M$  の極性が次のように決まるような乗算器です。

$$(+C) \times (+B) = (+M)$$

$$(-C) \times (+B) = (-M)$$

$$(+C) \times (-B) = (-M)$$

$$(-C) \times (-B) = (+M)$$

ここで言う「極性」は、「位相」と換言できます。例えば、 $+B$  のとき  $C$  と  $M$  は同極性ですが、 $-B$  のとき  $C$  と  $M$  の極性は逆転しています。これを電氣的に言えば、「 $C$  と  $M$  の位相が、 $B$  の位相に依存している」わけです。

さて AM 変調だけを考えると、四象限乗算器が必要不可欠か？と言えそうですがありません。二象限乗算器すら必要ないのです。なぜなら、AM 変調波には、位相反転が不要だからです。このことから AM 変調は、一象限だけで十分のはずなのです。

図4が、これをよく表しています。図4の LINE 信号 (上) は、D101 の  $+0.6[V]$  に重畳します。このことで、LINE 信号と TR103 エミッタ (下) の信号に負の電圧は存在しません。つまり、全て正極性の信号です。これを座標平面で表せば第一象限ですから、「一象限変調」と呼んでいるわけです。

このアイデアを具現化するために、あれこれ考えてたどり着いたのが図1の回路です。結果として原理的に直線振幅変調ができ、直流変調が可能で、しかも低電圧動作に向けた簡単な回路ができたものです。

May/03/2009