

送信・発振・受信・測定・給電…理解の早道!

できる無線回路 の製作全集

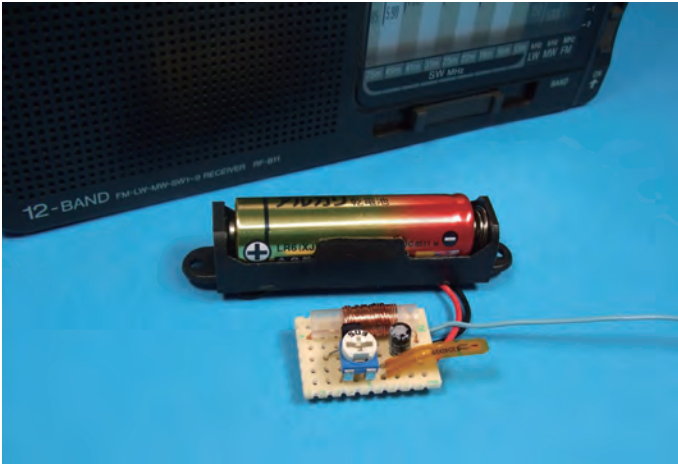
漆谷 正義 著

このPDFは、CQ出版社発売の書籍「できる無線回路の製作全集」の一部見本です。内容・購入方法については、下記のWebサイトをご覧ください。内容： <https://shop.cqpub.co.jp/hanbai/books/41/41391.html>

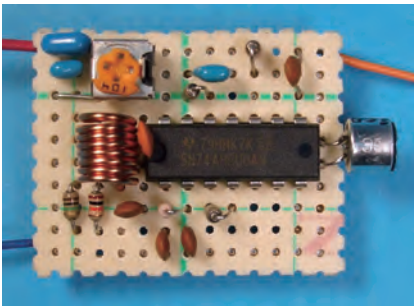


見本

カラー写真で見る製作アイテム



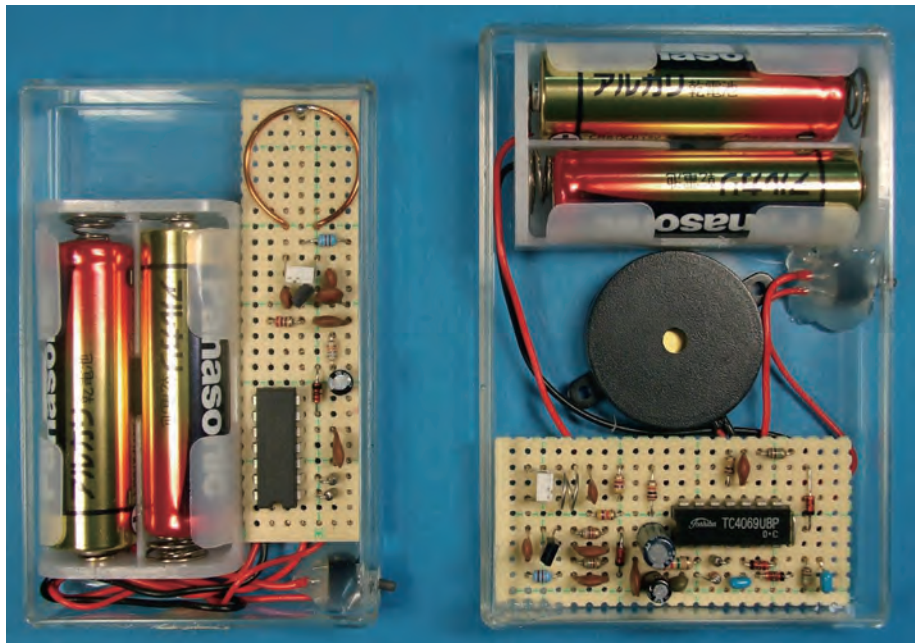
〈写真1〉 トランジスタ1石だけで作れる簡易温度テレメータ(第1章)



〈写真4〉 CMOSロジックIC1個で作れるFMワイヤレス・マイク(第4章)



〈写真2〉 トランジスタ1石で作れるリモコン・ファインダ(第2章)



〈写真3〉 UHF微弱電波を利用した置き忘れ防止アラームの製作(第3章)

イントロダクション 無線/高周波を理解する早道は 振る舞いを体験すること

RF回路の製作へようこそ!

編集部

はじめに

本書は無線と高周波の技術解説マガジン「RFワールド」に連載した製作記事の集大成です。

“RF”とはRadio Frequency, つまりラジオに使われるような無線周波すなわち高周波を意味します。今日のRFは放送、通信、測位/測距、気象レーダーや医療機器などのほか、電力伝送などの無線エネルギー利用へと用途が広がっています。

■ ラジオ工作の歴史

インターネットが今日のように普及する前の時代には、科学大好き青少年の趣味として電子工作があり、定番的な入門テーマの一つとしてラジオや無線機の自作があって、関連する雑誌や書籍がたくさん愛読されました。彼らはラジオ少年と呼ばれ、十分な資金も測定器もないなか、作った物がうまく動作することを夢

見て胸をときめかせ、雑誌記事などを参考にしてとにかく製作に挑戦するのです。しかし、一発で動作することは稀で、たいていは動作しない原因をあれこれ悩みながら配線違いをチェックしたり、調整不良を直して完成させたのです。近所に詳しい仲間がいると情報交換したり教えあったりして、切磋琢磨したものです。そして期待通りに動作させることができると、それまでの苦勞が吹き飛び、達成感と喜びに浸るのです。この成功体験がさらに高度な回路の製作に挑戦する原動力となりました。

こうして高周波(RF)の面白さを知った青少年が日本のエレクトロニクス分野に興味関心を持つ層の裾野を広げ、長じてはエンジニアや研究者となってエレクトロニクス産業の隆盛につながりました。

■ 回路の振る舞いを体験することが理解につながる

RF回路は、手を近づけると周波数がふらついたり、

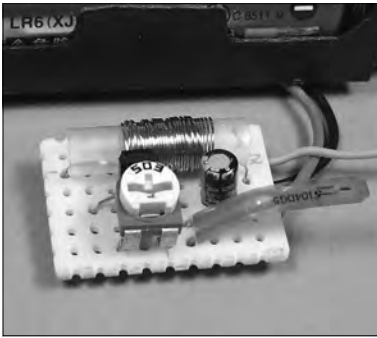
最初はうまく動作しないけど…



成功体験でレベルアップ!



〈図1〉無線/高周波を理解する早道は実回路の振る舞いを体験することにある



第1章 短波ラジオで受信する！ 広帯域インパルス方式 トランジスタ1石だけで作れる 簡易温度テレメータ

■ たった1石の簡易温度テレメータ

離れたところや、容器の中などのように、電線を出し入れできないところの温度を測定するには、無線を使ったテレメータが使われます。テレメータは小型、低電力であることが求められますが、ここで紹介するのは、写真1のように、トランジスタ1石を使ったとても簡易なもので、短波ラジオを使って「コツ、コツ、…」というテレメトリ音を数十cm～数m離れて受信できます。

■ AMには厳しい電波環境

長波、中波、短波をAMでワッチすると、昔(半世紀前)に比べて、ハイテク機器からのノイズがずいぶん増えてます。微弱電波を利用する場合、もはやAMでは駄目かと思われますが、バンド(周波数帯)を選べばノイズの少ない領域があります。

本機のようにコイル電流をトランジスタでON/OFFしてインパルス波を発生するだけの送信機であれば、送信スペクトルが広範囲(3M～30MHz)に拡がるので、受信側でノイズの少ないバンドを選ぶことができます。



〈写真1〉 たった1石で作れる温度テレメータ(ラジオから「コツ、コツ」とクリック音が聞こえる)

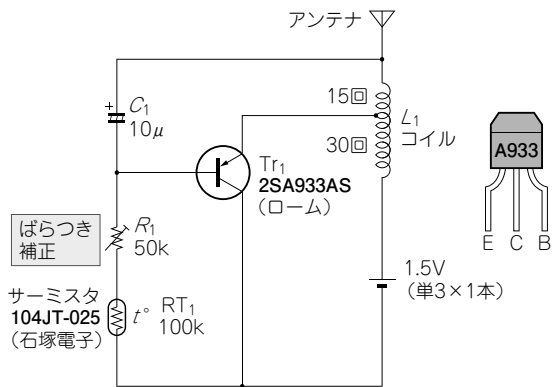
■ サーミスタでクリック周期を変える

図1が回路、写真2が組み立て例です。コイルの仕様は、第2章で紹介する「リモコン・ファインダ」とほぼ同じですが、コイルの巻き芯に使うストローの直径は5mm程度のもので使います。R₁はサーミスタのばらつきを補正するためのものですが、精度を気にしなければ、27kΩの固定抵抗でかまいません。

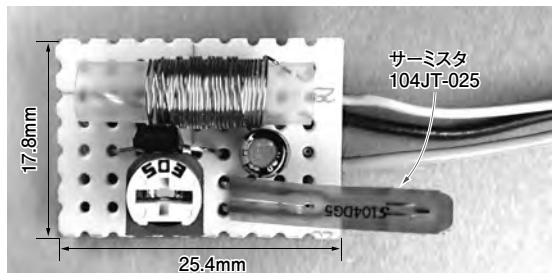
サーミスタの仕様を表1に示します。よく使われるNTCタイプ(温度上昇で抵抗値減少)を選びました。

■ 回路の動作

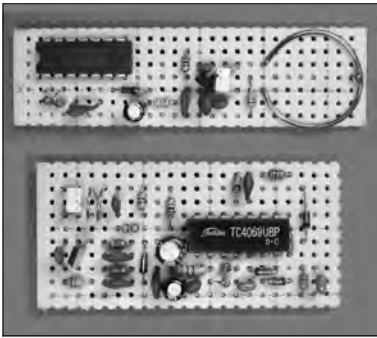
最初にコンデンサC₁が充電されて、トランジスタTr₁のベース電位が下降していきます。充電電圧が



〈図1〉 1石で作る温度テレメータの回路



〈写真2〉 温度テレメータの組み立て例



第3章 送信も受信も シンプルな構成で作りやすい UHF微弱電波を利用した 置き忘れ防止アラームの製作

置き忘れ防止アラームとは？

荷物の中にアラームを入れておき、置き忘れや盗難によって、荷物と人間、または荷物どうしが一定距離以上離れるとアラーム音を発する装置、いわゆる「置き忘れ警報器」を製作してみましょう。

このような装置は、小型軽量で、アンテナが露出していないこと、消費電力が小さいことが求められます。そこで回路をできるだけ単純化し、UHF帯を利用することで、送信側のアンテナを小さくし、受信側はアンテナなしとしました。写真1に外観を示します。

方式の検討

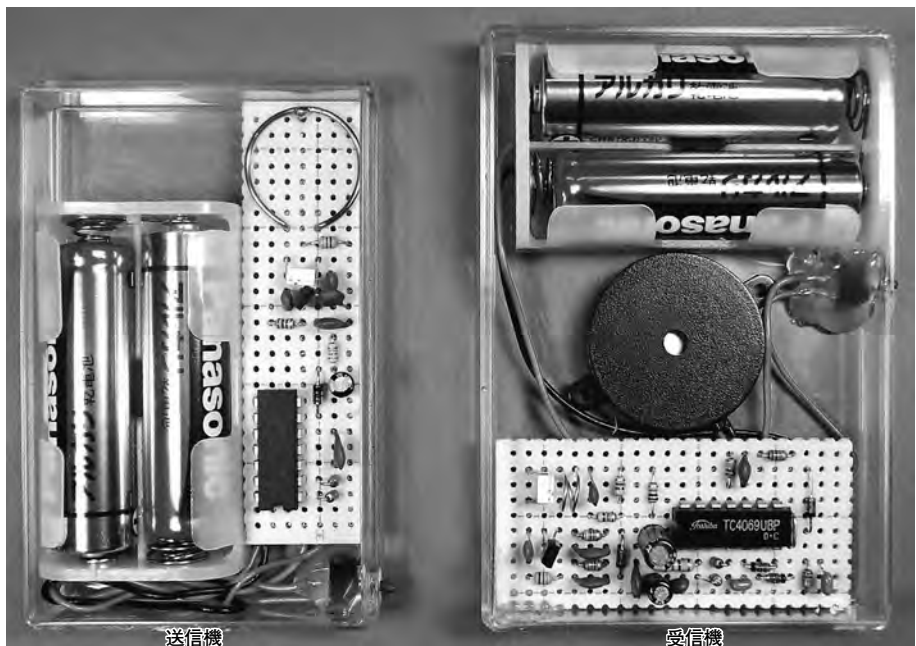
■ 310 MHz バンドの機器は製作が容易

UHF帯の310 MHzバンドは、マイカーのキーレス・

エントリー、玄関のチャイム(呼び鈴)などに広く使われるようになりました。その多くは特定のコードで変調することで、お互いの干渉を防止しています。

UHF帯ではアンテナを小さくできるだけでなく、受信機に超再生検波回路を使えば、送信機のみならず受信機もそれぞれトランジスタ1石で実現できて簡易化できます。ただし、スペクトラム・アナライザなどの高価な測定器がないと、送受信周波数の確認ができないという難点があります。

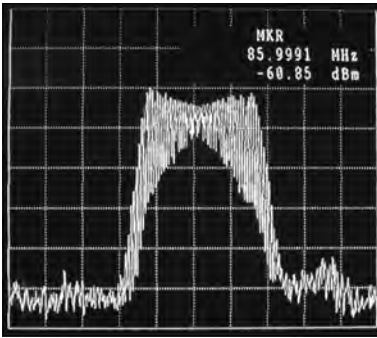
測定器がない場合は、比較的廉価(数万円～)な、周波数シンセサイザ型の広帯域受信機を使います。AM、NFM、WFMなどに対応しているので、本機のようにAM変調がかかっているだけで簡単に周波数を測定できます。この場合、スプリアスを区別するために、受信アンテナ利得を下げるか、送信機との距離を離す必要があります。



〈写真1〉
製作した置き忘れ防止
アラームの外観

送信機

受信機



第4章 74AHC04で低周波からFM放送帯までを扱う

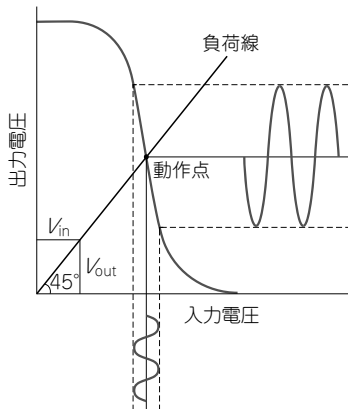
CMOSロジックIC 1個で作れるFMワイヤレス・マイク

■ CMOSロジックICをアナログRF回路で使う

ワイヤレス・マイクの製作記事は、雑誌やネットで広く見受けられます。そのほとんどがトランジスタ1~2石のもので、FM放送の周波数帯を使っています。定番回路がいくつかあるので、あえて紹介するまでもないアイテムです。そこで趣向を変えて、デジタル回路用の標準ロジックICを使ってFMワイヤレス・マイクを作ってみました。写真1がその外観です。この中に、発振回路、緩衝増幅器、出力アンプ、そしてマイク・アンプすべてが入っています。

標準ロジックICは、当然ながらアナログ信号を扱うようには設計されていません。ところが、中に一つ例外があります。インバータの74HCU04です。“U”はアンバッファード(un-buffered)の意味で、図1(b)のように、バッファが入っていません。図(a)は通常のバッファ・タイプの構成で、ゲインが図(b)の400倍もあってアナログ用途には使いづらいです。

図2はアンバッファード・タイプしきいの入出力特性です。入出力が反転する閾値付近のカーブがゆるやかであることが特徴です。この部分を使ってリニアな増幅作用を得ることができます。

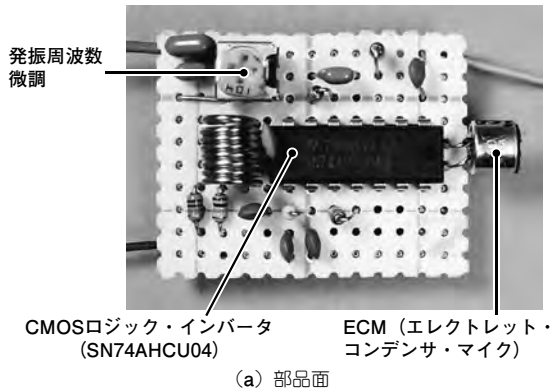


〈図2〉 CMOSリニア・アンプの入出力特性と動作点
(動作点は45°の負荷線とカーブの交点)

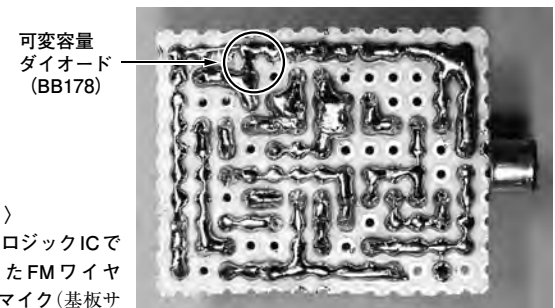
■ 回路設計

● CMOSでLC発振を実現する

図3が本ワイヤレス・マイクの回路です。IC_{1a}は76~90MHz帯の発振回路です。コイルL₁は、イン

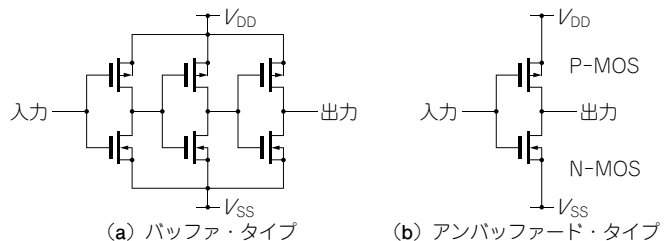


(a) 部品面



(b) はんだ面

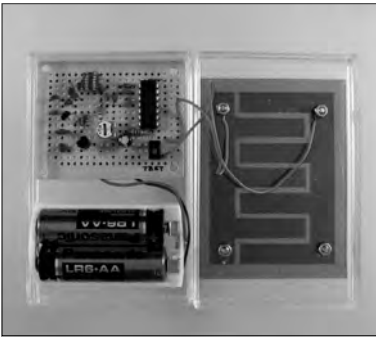
〈写真1〉 CMOSロジックICで製作したFMワイヤレス・マイク(基板サイズ36×28mm)



〈図1〉 74HCシリーズICのロジック・インバータの内部回路

第5章 FMラジオからの警報音で 確認できる！

ワイヤレス雨降りアラームの製作



手軽に作れる 雨降りアラームはいかが？

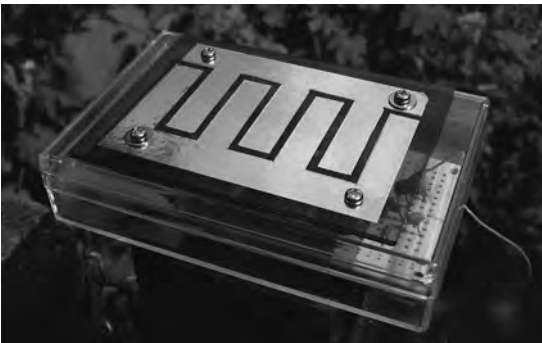
夕立ちが気になる季節です。洗濯物やふとんを干しているときに、雨が降らないか心配なことがありますか？ときどき外に出て空模様を見るのですが、忙しいときには忘れてしまうこともあります。こんなとき、雨降りアラームがあれば安心かもしれませんよ。

警報音が屋外で鳴っても室内にいと聞こえないので不便です。ワイヤレスにすれば便利ははずですが、送信機はまだしも、性能が良くて使い勝手の良い受信機を製作するとすると、ノウハウが必要であり、製作には相当な手間暇をかけなければなりません。

でも、市販の受信機(ラジオ)を使うことができれば、製作上のバリアはかなり低くなります。さらに、ラジオを改造したり、ほかの機器を接続したりする必要が無ければ実用性はぐんとよくなります。写真1はこのような方式の雨降りアラームです。

FMラジオから警報音を鳴らす

降雨センサからは常に無変調キャリアを送信しておき、降雨時にはキャリアに警報音で変調をかけることにします。このようにすれば、ラジオに手を加える必要が無くなります。FM放送波帯(76 MHz ~ 90 MHz)を使えば、送信アンテナが短くて済み、雑音や



〈写真1〉 庭で動作中のワイヤレス雨降りアラーム

混信も少なく、同調も取りやすい(ほとんどの受信機にAFCがある)という利点があります。

表1が本器の仕様です。降雨により、FMラジオから警報が鳴りますが、警報音がうるさければ、FMラジオをOFFすれば良いのです。雨が上がってセンサが乾燥すれば警報音は止まり、次の雨に備えます。

センサ回路と警報音発生回路

図1が全体の回路です。センサは雨水の導電性を利用したもので、作り方は後述します。降雨によるセンサの抵抗変化を R_1 を通じて電圧変化に変換します。次に高入力インピーダンスのCMOS NANDゲートIC 74HC00 (IC_1)のスレッシュホールド(約 $1/2 V_{CC}$)を利用してロジック・レベルに変換します。これにより IC_{1a} の出力は、通常時Lレベル、降雨時Hレベルとなります。

IC_{1b} 、 IC_{1c} 、 IC_{1d} は移相型RC発振回路です。 R_3 を通じた C_1 の充放電により、矩形波を発生します。NANDゲートの他方をさきほどの降雨時Hレベルの信号に接続すれば、降雨時にFM変調用の矩形波を発生させることができます。この波形で次項のVHFキャリアをFM変調します。

FM送信回路

発振回路は、電源電圧と温度変化による発振周波数の変化が小さいクラップ発振回路です。共振回路に変容量ダイオードを使ってFM変調をかけています。

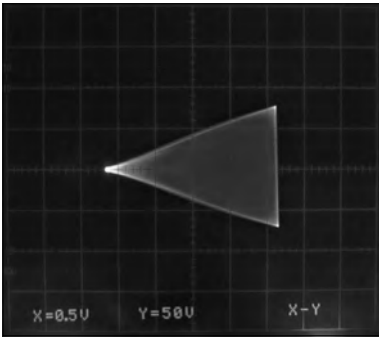
図2に使用した可変容量ダイオードBB178の特性

〈表1〉
製作したワイヤレス
雨降りアラームの仕様

項目	仕様
送信周波数(無変調時)	84 MHz
送信周波数可変範囲	± 0.5 MHz
周波数偏移	± 100 kHz
変調周波数(警報音)	約1 kHz
電源電圧	約3V(単3×2)
消費電流	約6 mA
降雨センサ感度	降雨時: 数M Ω

第6章 古くて新しい高効率な 振幅変調方式を試してみよう！

ベクトル合成AM ワイヤレス・マイクの製作



高効率AM変調： アンプリフェーズ方式

■ 振幅変化を位相変化によって作り出す

1955年、AMラジオ放送華やかなりしころ、米国RCA社は、従来の考え方と異なる「アンプリフェーズ」方式の50 kW ラジオ送信機BTA-50G(写真1)を世に出しました。アンプリフェーズとは、amplitude(振幅)をphase(位相)によって作るという意味の造語で、送信機内部では位相変調信号で処理して、最後にアンテナ回路でベクトル合成して振幅変調波を得るAM変調方式です。

送信機の内部回路で扱う信号は位相偏移信号だけなので、RF部の振幅直線性に気をを使う必要がなく、ノンリニアながら高効率が得られるC級動作の電力増幅回路が使えます。また、大電力の変調回路や大きくて重い変調トランスが不要なので、消費電力が少なくて低コストな大出力AM送信機を実現できる利点があります。

この変調方式をRCA社は“Ampliphase”の名称で採用していましたが、一般には考案者の名前をとってシレー変調(Chireix modulation)とか、アウトフェー

ジング増幅とか、LINC(Linear amplification using Nonlinear Components)方式などとも呼ばれます。

中波のAMラジオ放送用送信機で使われた技術であり、後継機のBTA-50Hが1961年、BTA-50Jが1970年に発売され1978年まで生産されます。しかし、それを最後に、調整が面倒なこともあってか、その後アンプリフェーズ方式は廃れてしまいました。

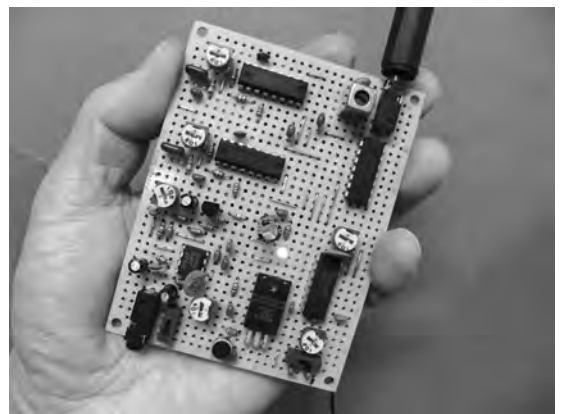
この動作原理はデジタル変調で使われるQAMにも通じるものであり、今日では携帯電話基地局のパワーアンプへの応用が検討されています。

それでは、原理を紐解きながら、私たちが「アンプリフェーズ」方式のワイヤレス・マイクを作ってみようではありませんか！

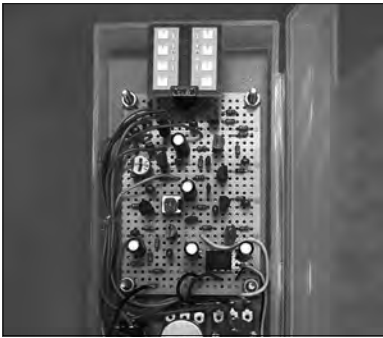
写真2は、製作したベクトル合成AMワイヤレス・マイクです。PLLとデジタルICだけでAM信号を作っています。アンプリフェーズの原理に忠実にしたがって設計したものです。若い方には現代に蘇ったアンプリフェーズ方式を知る良い教材となるでしょう。また、シニアの方は、ミニ放送局として、AMラジオに昭和のBGMを流して、いにしえに想いを馳せながら、オシロスコープでベクトル合成のようすを眺めるのも一興です。



〈写真1〉RCA社の50 kW ラジオ送信機BTA-50G(1955年)



〈写真2〉製作したベクトル合成AMワイヤレス・マイク



第7章 24 GHz帯に音声を乗せて 準ミリ波帯を体験する

なんちゃって5G! FMトランシーバの製作

1 はじめに

最近では新聞やTVなどで通信インフラの新技术^{ファイブジー}“5G”の話題で持ちきりですね。スマホなどのIT機器の普及/発達により、通信回線に乗る動画などの情報量が膨大になり、通信速度の限界を皆が感じていたところでした。5G技術は、これを解決する救世主として大きな期待がかかっています。

5G技術は複雑多岐にわたり、現在始まっているのは通称「サブ6」と呼ばれる6 GHz以下を使うサービスです。今後はミリ波に近い準ミリ波の28 GHz帯を使うことが予定されています。5G技術にあやかるだけでは、なかなかその中味は実感できません。そこで、5Gで使われる周波数帯に近い、24 GHz帯のトランシーバを作ってみました。名付けて「なんちゃって5G! FMトランシーバ」(写真1)です。

この製作は実用性よりも、実験を通じてミリ波の性質、とくに波長、指向性、反射、干渉、偏波、フェージング、遮蔽物による減衰などを体感することに主眼を置いています。

2 ミリ波と5G技術

2.1 搬送周波数が高ければ相対的に 広い帯域が得られる

動画などの膨大な情報量を伝送するためには、基本的に広い周波数帯域が必要となります。半世紀前、ラジオからテレビの時代になったときは、MF(中波)や

HF(短波)から、一挙にVHF(超短波)やUHF(極超短波)へと搬送周波数が高くなりました。これによって相対的に帯域幅を広く取ることができるからです。

セルラー無線でも同様に、4Gの1~3.6 GHz(センチ波)から、5Gでは28 GHzなどの、より短波長な準ミリ波の電波が使われます。

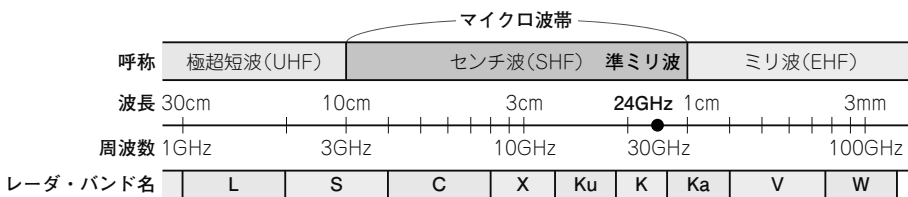
図1のように、3~30 GHzはマイクロ波帯と呼ばれ、衛星通信/衛星放送、無線LAN、ETC、レーダーなどに広く利用されています。マイクロ波のうちミリ波に近いセンチ波は準ミリ波と呼ばれています。

2.2 フェージングが悩みのタネ

無線の搬送周波数がセンチ波やミリ波になると、フェージングの影響が顕著になります。これは山や建物などの反射や、通信機器が移動することにより、到来電波の位相差による強弱が発生する現象です。フェー



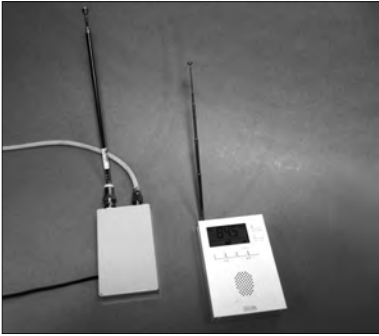
(写真1) 製作した「なんちゃって5G! FMトランシーバ」



(図1) マイクロ波帯の呼称、波長、周波数、レーダ・バンド名

第8章 FMラジオ放送帯域へ 補完放送を変換し、送信して楽しむ

微弱電力型FM補完放送 コンバータの製作



FM補完放送コンバータとは

2016年から、FM補完放送が本格的に始まりました。これは難聴対策や災害対策のために中波ラジオ放送帯(535～1650 kHz)のAM放送をVHF帯の90～95 MHzで放送するものです。

これには「ワイドFM」という愛称が付けられましたが、そもそも無線分野では「ワイドFM」は周波数偏移が大きいFM変調方式の呼称であり、「補完放送」を意味するものではありません。

さて、FM補完放送の本格的開始に伴い、それに対応したラジオが次々と発売されています。従来のFMラジオやFMチューナのうち、アナログTV音声の受信に対応したもの以外は90 MHz以上を受信できません。また、地上デジタル放送の開始後に発売されたラジオだと、90 MHz以上を受信できないのが普通でしょう。

従来からある90 MHz以下のFM放送バンドに対応

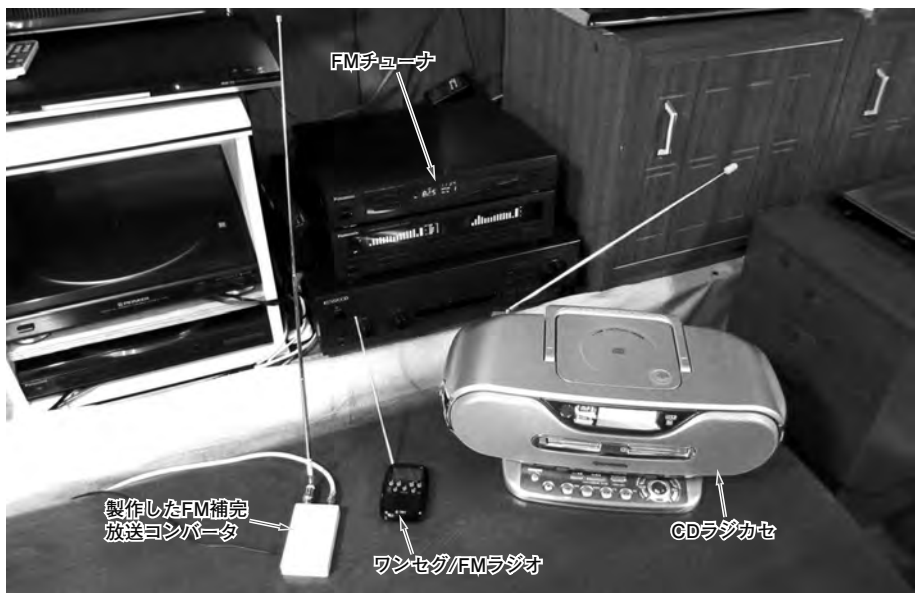
したラジオやチューナでFM補完放送を受信できれば、新たに機器を買う必要がありません。

そこで、FM補完放送帯域(90～95 MHz)を従来のFM放送帯域(76～90 MHz)に変換する「FM補完放送コンバータ」(写真1)を作ってみました。FM方式の補完放送をFM放送帯に変換するので、いうなれば「FM-FMコンバータ」とも呼べるでしょう。

FM補完放送について

日本のFM放送の帯域は76～90 MHzです。90 MHz以上はアナログTV放送のVHF帯域に割り当てられていましたが、地上デジタル放送への移行とともに、TV放送帯域がUHFに移行し、90 MHz帯がほかの用途に使えるようになりました。FM補完放送サービスもその一つです。

FM放送は、76～90 MHzのVHF帯域なので、1局あたりの占有周波数帯域を広くできます。そこで、雑音に強く、音質が良いFM変調方式が採用されていま



〈写真1〉稼働中のFM補完
放送コンバータ

第9章 ノイズが無く、音質が良い FM方式を採用した 電灯線で音楽を送る キャリアホンの製作

キャリアホンについて

■ 音声を高周波信号に載せて電力線で送る

電灯線を伝送媒体とする通信は Power Line Communication PLC と呼ばれ、最近では家庭内 LAN の通信路として期待が寄せられています。しかし、通信速度の高いデジタル伝送用

PLC は、電波でいえば短波領域を使うため、不要輻射の問題が付いて回ります。これに対してキャリアが 100k ~ 200 kHz の音声伝送ならば、効率的に電灯線へキャリアを重畳することができ、製作も容易です。このように電力線搬送技術を使って音声を送受信する装置は一般に「キャリアホン」と呼ばれているようです。

電灯線は冷蔵庫やエアコン、電子レンジなどさまざまなノイズ源が接続されており、AM 方式では品位の高い通信はまず望めません。そこで FM 方式を採用したキャリアホンを製作してみました。マイク音声のほかに、i-Pod の音楽などを入力できるライン入力も備えています。

写真1が送信機、写真2が受信機の外観です。

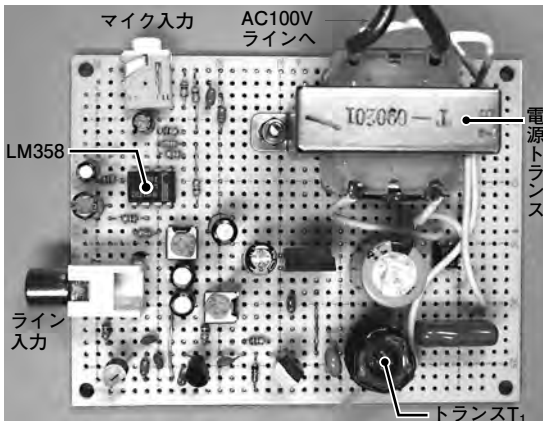
■ AC ラインのライブ / 接地側は無関係とする

表1に製作するキャリアホンの仕様を示します。

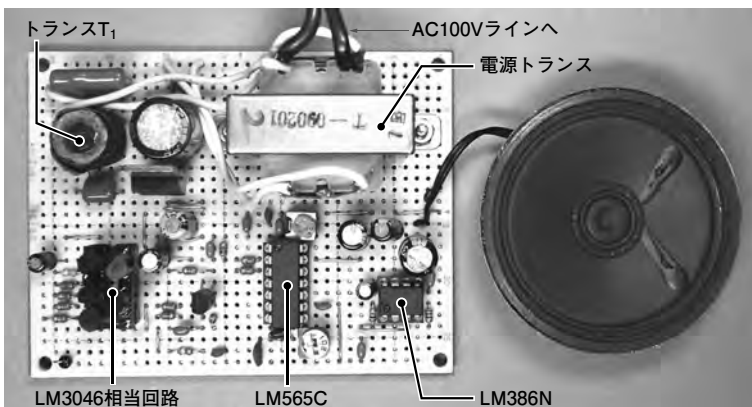
周波数偏差は ±10% 程度に抑えています。簡単にするため、エンファシスはかけていません。受信機はスピーカを直接駆動できるようにしました。

また使い勝手を向上させるため、AC ラインのライブ / 接地に関係ない回路構成としました。

この装置を2組作れば同時通話型インターホンができますが、その場合は送受信のキャリア周波数をずら



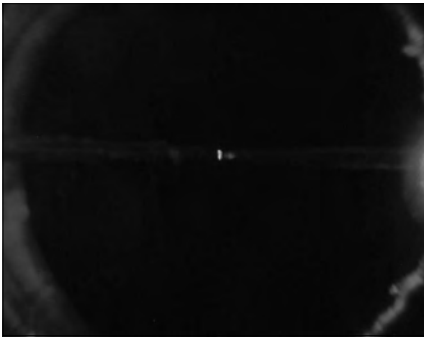
〈写真1〉キャリアホンの送信機(ACラインにFM変調した搬送波を送り出す)



〈写真2〉キャリアホンの受信機(ACラインからのFM変調波を復調する)

〈表1〉製作したキャリアホンの仕様

項目	仕様
キャリア周波数	200 kHz
周波数偏差	± 20 kHz
音声入力	コンデンサ・マイク
ライン入力	0.2 V _{p-p}
周波数特性(マイク)	200 ~ 4000 Hz
周波数特性(ライン)	20 ~ 20000 Hz
音声出力	1W (8Ω)
消費電力(TX/RX)	1.8 W/1.4 W



第11章 身近な材料を使って 電磁波を作ってみよう！

ヘルツの実験を史実に近い 装置で再現する

歴史的な実験を再現しよう！

電磁波の存在は、マクスウェルが1865年に理論的に予言しましたが、これを実際に実験で確かめたのは、ヘルツだったことを皆さんご存じだと思います。真空管もトランジスタも、検波器もない時代に、電磁波を発生させ、これを受信できたことは天才のひらめきとしかいいようがありません。

ヘルツの実験を再現する試みは、学校などの教育現場を中心に行われているようですが、今一つ完全かつ忠実に再現できていないように思えます。それは、次の点がオリジナルと異なるためです。

(1) ヘルツは連続火花で実験しているが、かわりに圧電素子などによる単発火花で実験している。

(2) ヘルツの受信アンテナでは、火花が飛ぶことになっているが、かわりにネオン・ランプを使用している。

そこで、上記(1)(2)の不完全さや難点を払拭すべく、ヘルツが使った実験装置とまったく同じ寸法で送受信器を製作し、実験方法もヘルツと同じやりかたを踏襲することにより、再現を試みました。

写真1が試作した実験装置で、できるだけ簡単な手段や回路を選び、追試しやすいように材料・部品選定などを配慮しています。

実験装置の検討と製作

■ アンテナの寸法を決める

図1は、ヘルツが作った実験装置にクラウス教授が寸法を書き込んだ図⁽¹⁾などを参考に、私が作成した寸法図です。この寸法どおりに作ります。

送波器は、中央に小球状の電極があり、他端のやや大きな金属球(直径25 cm)と電線(直径2 mm、長さ約1.5 m)で接続されています。そして、これが左右対称に配置されています。全長は3 mです。

受波器は、電線を長辺1.2 m、短辺0.8 mの矩形に曲げて、短辺の1か所にギャップを設けます。

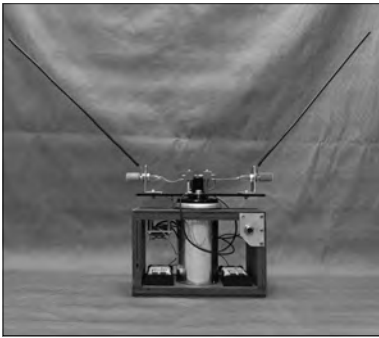
■ 送波器の製作

● 送波用火花発生部(ギャップ)の製作

1 辺 10 mm のアルミ角棒と、アルミのブラインド・



〈写真1〉ヘルツの実験を再現するための装置



第12章 火花放電式送信機, コヒーラ式受信機, モールス印字機を手作りする

火花放電式無線電信機の実験

電波の発見と通信への応用の幕開け

■ ヘルツの実験

無線通信の発明と実用化は、真空管や半導体の発明より古く、1800年代に遡ります。電波を火花放電で発生させると、離れたところに置いた円形ループ・コイルの間隙に火花放電が生じるのを発見したのが有名な「ヘルツの実験」(1887～88年)でした。

ヘルツの実験では、到達距離は十数mだったようです。送信側の火花電力を大きくすれば、より遠方でも受信火花を観測できるだろうことはH. R. ヘルツもわかっていたでしょう。しかし、ヘルツの実験の趣旨は「電波が実在することを確かめる」という学問的なもの(真理の探究)だったので、これで十分でした。なお、この距離は、電波反射板との距離です。ヘルツは、この距離を定在波を確かめるために変化させたのであって、どこまで届くかを確かめようとしたのではありませんでした。

■ ブランリーによるコヒーラの発明とその応用

通信分野への電波の応用は、より高感度な検波器(電波検出器)が必須でした。最初に使用されたのが、コヒーラ(coherer)です。

コヒーラは1889年にフランスのE. ブランリーが發明しました。細いガラス管の中に、銀やニッケルなどの金属粉末を封入したもので、両端には電極を設けています。この電極間(つまり金属粉末)の抵抗値が、電波の到来により変化することが特徴です。

コヒーラを無線通信に使う試みは、その直後、Sir Oliver Joseph Lodge O. ロッジ、Guglielmo Marconi G. マルコーニと相次いで行われます。また日本では、海軍の三六式無線電信機に使用され、日露戦争の日本海海戦において、敵艦発見の重大情報を打電し、勝利に貢献したことは有名です。

■ 本実験について

本稿では当時を偲んで、当時入手できたであろう部

品だけを使って製作した機器(写真1)によって通信を再現実験します。ただし法規上、火花放電で発生した減幅電波(いわゆるB電波)の発射が禁止されていること、周囲の測定器や情報機器への被害防止のため、室内で1m程度の距離の実験に留めました。

図1は本実験で得られた受信印字出力です。“Radio Frequency”を略して、通信テストには“RF”の繰り返しを使用しました。

コヒーラの製作と特性評価

■ コヒーラの構造と使い方

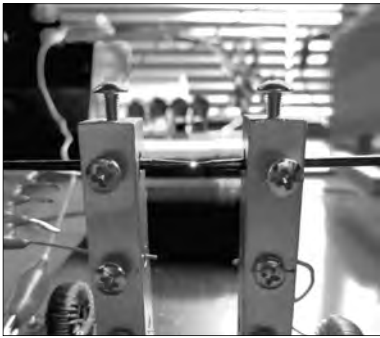
この実験では、電波の検出にコヒーラを使います。マルコーニらが使ったコヒーラの構造は、図2のように銀の電極の間に、ニッケルと銀の粉末をはさみ、ガラス管に封入したものです。ガラス管の内部は真空に引いています。

二つの電極は、プラチナ線でガラス管の外部に導かれます。当時は、コヒーラを図3のように接続して火花電波を受信していました。

アンテナからのRF電流によってコヒーラが短絡し、チョーク・コイルを通じて電池からの電流がリレーとデコヒーラの巻き線に流れます。デコヒーラは、コヒーラを叩き、コヒーラは再び絶縁状態に戻りますが、電波が到来している間はこの断続動作を繰り返します。したがって、電波の持続中は印字機(ペン・レコーダ)によって紙テープ上に線が引かれるので、その長短からなるモールス符号を読み取れば情報を伝達できます。



〈図1〉火花放電式送信機からの電波を受信して得られたモールス符号印字出力(RFの繰り返し)



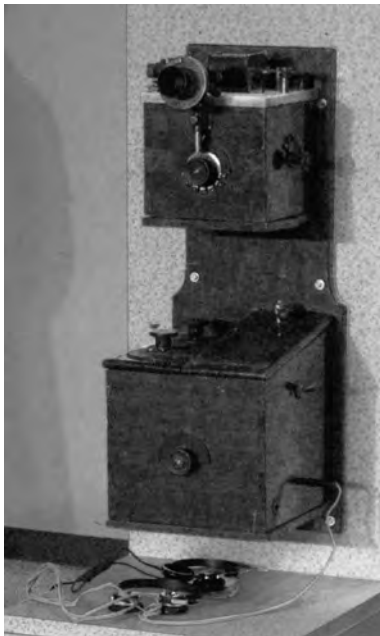
第13章 真空管もトランジスタもなかった 黎明期の通信を再現する

TYK 火花放電式無線電話機の実験

火花で持続電波を出せるのか？ 音声を送れるのか？

TYK式無線電話の発明から100年が過ぎました。TYKとは、世界初の実用無線電話機の発明者である、鳥潟右一、横山英太郎、北村政次郎各氏の頭文字を取ったものです。真空管もトランジスタもない時代に、火花放電から生じる電波を使って、無線で音声を送る装置が彼らの手によって世に送りだされました。1世紀を経た現在では、文献と展示品(写真1)が残ってはいませんが、実際に動作する装置を見ることはできません。

そこで、火花により持続電波(CW)が出るのか、さらに音声を送ることができるのかなどを歴史を紐解きながら、その一部を再現してみました。写真2は実験のようすです。



〈写真1〉TYK式無線電話機 [通信総合博物館所蔵。情報通信研究機構(NICT)において修復中の本体。アンリツ厚木アマチュア無線クラブ一杉氏撮影]

■ 火花で作った電波は雑音のかたまりでは？

携帯電話に代表される無線電話は、生活に欠かせない必須アイテムとなりました。電波を発生させることは、今日では半導体などの増幅作用による正帰還発振を利用して、難なく実現できます。しかし、真空管も半導体もなかった時代には、火花で発生させた電波が無線通信に一役買っていました。

雷がゴロゴロと鳴るときに、AMラジオにバリバリと雑音が入ることから、火花放電により電波が出ていることは容易に推察できます。しかし、このノイズ同然の電気振動に音声を載せることができるのでしょうか？仮に音声を載せることができても、放電による雑音でかき消されてしまうのではないのでしょうか？

動作原理

■ アーク放電により持続波を発生させる

放電には、自動車の点火装置のようにパチパチと飛ぶタイプと、電気溶接のようにポーと燃えるように弧(アーク)を作るタイプがあります。前者のような間欠放電の場合、パルス状の単発電波が繰り返されて発射されます。ドイツのヘルツHeinrich Rudolf Hertzはこの電波で実験を行いました。

一方、後者のアーク放電から、持続的電波を取り出せることが、1892年に英国のトムソンEilhu Thomsonにより見いだされました。

ドイツの物理学者ウィーンMax Wienは1906年に、放電回路とアンテナ回路の双方に共振回路を入れて、放電間隙と発生する電波との関係を子細に調べました。

単発火花によって電波が発生するのは、放電の都度1回だけですが、空気中の火花間隙を0.3 mm以下にすると、これを繰り返すことができます。図1のように放電によりギャップ部分の抵抗が大きくなって、放電が一瞬にして停止(瞬滅)します。この現象は火花の「ダンピング効果」と呼ばれます。1次側の振動周波数は共振回路の周波数で決まります。ここで1次回路

第14章 ソフトウェア・ラジオで 中波や短波を受信してみよう!

USBワンセグ・チューナ用 HFコンバータの製作



USBワンセグ・チューナ・ dongle を 流用した簡易型 SDR が静かなブーム

SDRは、これまで専用ハードウェアを必要としていましたが、近年普及して来たSDRベースの安価なUSBチューナ・dongleがそのプラットフォームとして利用できるようになりました。性能や感度は本格的なSDRには及ばないものの、入手性や価格、使いやすさの点で入門用として適当だと思います。無改造のままでも対応するSDRソフトウェア(後述)と組み合わせれば50 M~1.7 GHzの広帯域を受信できます。しかしチューナ・チップの内蔵オシレータの下限があり、そのままでは中波や短波の受信には使えません。

そこで写真1に示す簡単なコンバータを製作して、HF帯(~30 MHz)とVHFの低域(30 M~60 MHz)の電波を受信してみました。

安価なUSBチューナ・dongle によるSDR

■ SDR: ソフトウェア・ラジオとは

SDR(Software Defined Radio)とは、文字通り「ソフトウェアで定義されたラジオ」です。すなわちAMとかFMなどで変調された電波をコンピュータのソフ

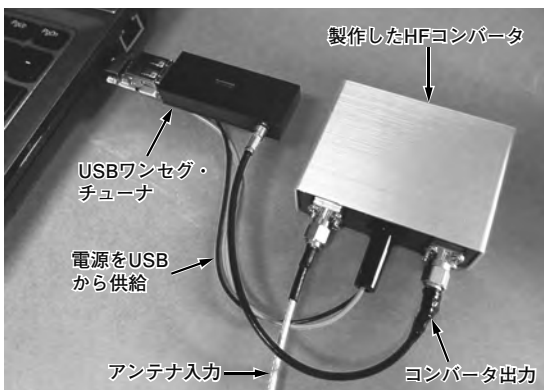
トウェアで復調する受信機です。さまざまな周波数の電波をコンピュータで処理できる帯域に変換して、あとはコンピュータ内部のソフトウェアにより、元の音声や映像信号を復調します。

SDRの利点はソフトウェアによってさまざまな変調方式に対応できる点にあります。例えば本稿で利用するUSBワンセグ・チューナは、パソコンのUSB端子に接続して、地上波デジタルのワンセグTV放送を受信するためのものですが、別のソフトウェアで使うとAM/FM/SSB/CWなどを受信できる広帯域受信機に早変わりします。

写真2は台湾製のUSBチューナ・dongle LT-DT306です。実売1,000~2,000円くらいで市販されています。ワンセグ放送の受信用として専用ソフトウェアを同梱して販売されていますが、インターネット上で入手できるフリーのSDRソフトウェア“SDR#”や“HSDR”と組み合わせると、50 MHz~1.7 GHzをカバーし、AM/FM/SSB/CWなどを受信できる広帯域受信機として使えます。

日本国内では類似のUSBチューナ・dongleとして表1に示すような商品が市販されています。SDR#やHSDRで使うにはRTLSDR対応の欄にOKと記した機種が適当です。

基本的な構成はチューナ・チップ+ADC/USBイン



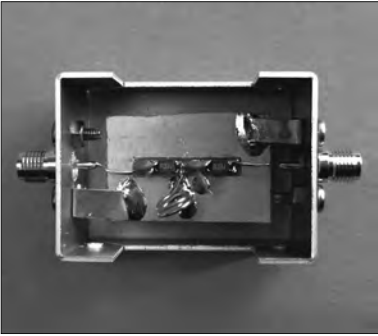
〈写真1〉 USBワンセグ・チューナ・dongleに接続したHFコンバータ



〈写真2〉 市販のUSBワンセグ・チューナでは付属ロッド・アンテナを使って受信する

第15章 エア・バンド、マリン・バンド、430 MHz帯の受信性能アップを図る

SDR受信機用プリアンプとBPFの製作



受信感度と多信号特性を チョッピリ改善したい！

前章で紹介したように、USBワンセグ・チューナとパソコン用の各種SDRソフトウェアとを組み合わせると、例えば24 M~1.85 GHzなどの広帯域にわたって放送や無線通信を受信できるようになります。しかし、この手の広帯域チューナ・ドングルの欠点として、アンテナからの信号を非同調のまま受信するので、目的外信号との相互変調や混変調により、多数の不要信号(スプリアス)が発生し受信障害となりやすいことがあります。また、目的外の強力な信号によってチューナの内蔵RFアンプが飽和して、S/Nが劣化することもあります。最近でこそ高感度チューナ・チップを搭載した製品が国内に出回り始めましたが、1年ぐらい前まではワンセグ・チューナ自体の感度も、微弱電波の受信に対して十分とはいえませんでした。

相互変調や混変調などの改善策としては、目的の受信帯域だけの電波を通過させるBPF(バンドパス・フィルタ)を前置する方法があり、帯域外の不要信号による干渉を軽減できます。また、チューナの感度不足に対しては、チューナのアンテナ端子にプリアンプを挿入すれば改善できます。ただし、プリアンプによって入力レベルが上がるので、相互変調/混変調特性はか

えて悪化します。そこでプリアンプの前段に前述のBPFを入れるのです。このようすを写真1に示します。

本稿ではUSBワンセグ・チューナを使ったSDRの受信性能を少しでも改善すべくプリアンプとBPFを製作した例をご紹介します。

プリアンプの設計と製作

■ プリアンプ回路の設計

プリアンプの製作を考えたとき次の二つの選択肢があります。

- ① トランジスタやFETで作る
- ② 広帯域増幅用ICで作る

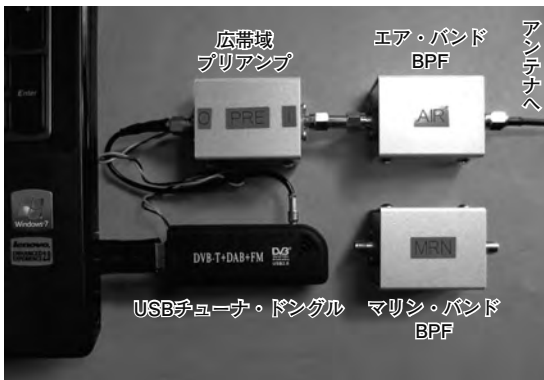
①は所望の特性を得やすい半面、部品点数が多く、パターン設計が性能を左右するなど初心者手がけるには難しいのが欠点です。今回は作りやすく再現性の良い②を選びました。

使用するICの性能として、利得や帯域幅と並んで重要なのがNF(雑音指数)です。NFが大きいと、いくら利得が大きくても、ノイズが増えてしまって受信感度がかえって悪化することもあります。

今回は入手が容易でNFが3 dB@1.5 GHzと、広帯域アンプにしては低雑音なGN1021(パナソニック)を選びました。製作するBPFの上限周波数は500 MHz以下であり、このときのNFは約2 dB、利得は25 dBです。入出力が50 Ωに整合済みというのも使いやすそうです。高周波半導体では定番のガリウム砒素(GaAs)タイプです。表1に定格や特性の一部を示します。

〈表1〉広帯域低雑音GaAsアンプGN1021の電気的定格や特性 [パナソニック]

項目	記号	値など
電源電圧	V_{DD}	4~12 V (8 V _{typ})
消費電流	I_{DD}	40 mA _{typ} @ $V_{DD} = 8$ V
雑音指数	F	3 dB _{typ} @ 1.5 GHz
電力利得	G_p	19 dB _{typ} @ 1.5 GHz
パッケージ	—	12ピンSO-10A



〈写真1〉製作したプリアンプとBPFなど



第16章 アンテナだけでソフトウェア・ラジオの世界を体感できる！

ノート・パソコンを使った 長波標準電波 JJY の受信実験

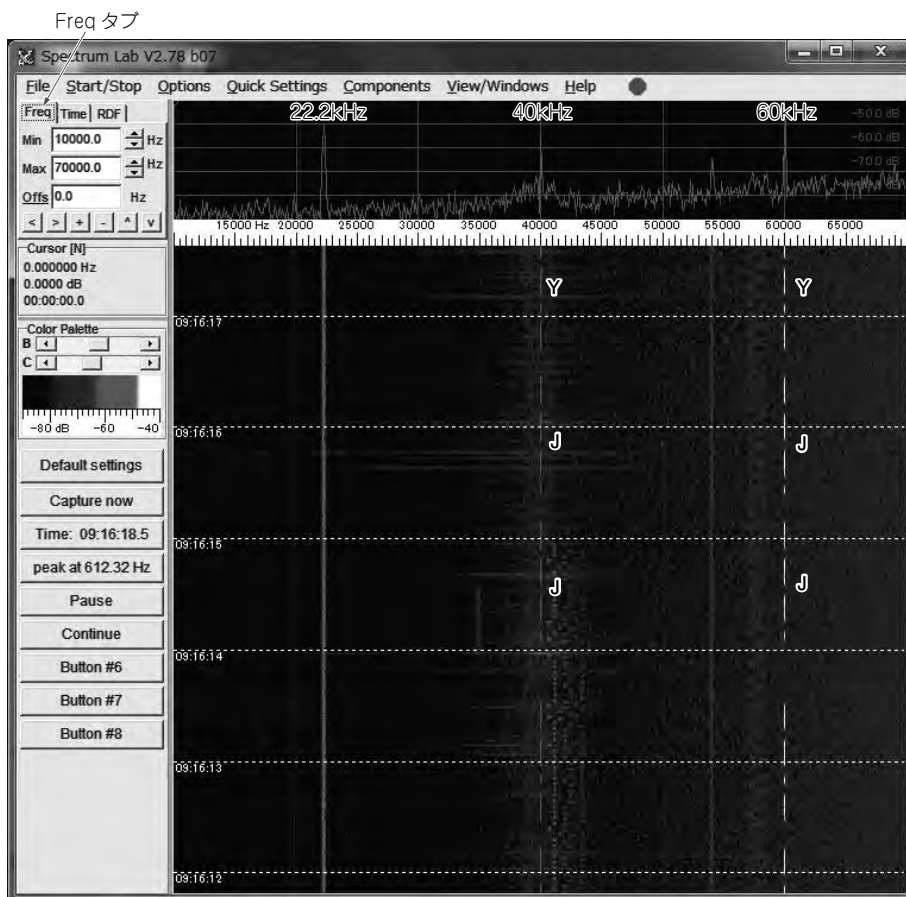
パソコンには、外部から音声を取り込むためのライン入力やマイク入力が付いています。実はマイクの代わりにアンテナをつなげば、電波を取り込むこともできます。

最近のノート・パソコンは内蔵オーディオ機能(サウンド・カード相当の機能)のサンプリング周波数を高く設定できるので、VLF帯はもちろん、より周波数の高いLF帯の電波も取り扱うことが可能になりました。この電波を受信するアプリケーションは、ソフトウェア・ラジオ(SDR)と呼ばれています。

今回はSDRの手始めとして、できるだけ簡単な方法で、40 kHzと60 kHzで送信されている標準電波局JJYを受信してみましょう。図1はノート・パソコンで受信したVLF～LF帯の電波の例で、左からJJJ(22.2 kHz), JJY(40 kHz), JJY(60 kHz)です。

SDRとは？

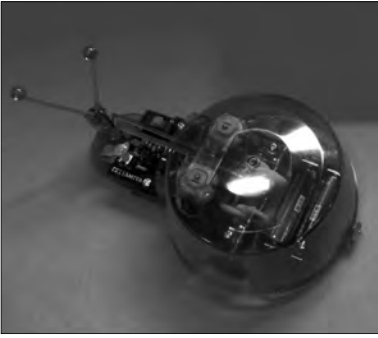
これはSoftware Defined Radioの頭文字で「ソフトウェア・ラジオ」と呼ばれています。ふつうのラジオ



〈図1〉 ノート・パソコンで受信したVLF～LF帯の電波

第17章 RF電流の流れる電線を辿って走る

誘導無線トレース・カーの製作



誘導磁界を辿って走行するトレース・カー

模型の「ライトトレース・カー」をご存じでしょうか？これは白地に描かれた黒い線(ライン)を辿りながら進みます。この黒いラインのかわりに電線を張って高周波電流を流せば、それを標識として車を電線に沿って走らせることができそうです。電線を紙の裏に隠せば、一見マジックのように見えることでしょう。

地下鉄の列車無線の一部で使われている「誘導無線」は、上に述べたような誘導架線を通じて、RF信号を送受して通信するものです。同じ原理を応用したものが「誘導無線トレース・カー」(写真1)です。市販の安価な光学式ライトトレース・カーを少しだけ手直すればよく、趣味や教材として手軽に製作できます。

誘導無線とは

■ 電磁誘導を利用する無線

電磁誘導はモータや発電機でおなじみの現象です。図1において、導線に電流を流すと、電流の方向に右

ねじが回転する方向に磁力線が発生します。これは「アンペールの右ねじの法則」として有名です。図は直流電流の場合ですが、導線に高周波電流(交流)を流すと、周囲の磁界は高周波電流の周期に応じて方向が反転します。この磁界はループ・アンテナのようなピックアップ・コイルを使うと検出できます。

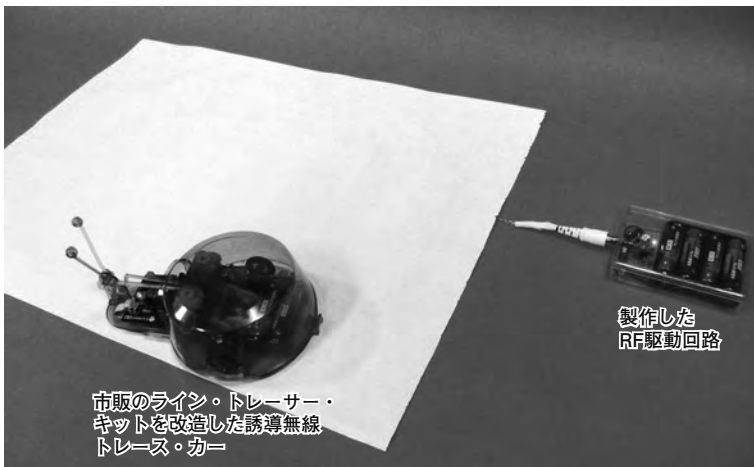
このときの電流の方向は、磁束の変化を妨げる向きになり、「レンツの法則」として知られています。

導線に流れる高周波の周波数が高くなると、上記の誘導磁界のほかに放射電磁界が現れ、電波が発生します。以下に述べる誘導無線は、導線から数m以内の誘導磁界を利用するものであって、電波を使うものではありません。

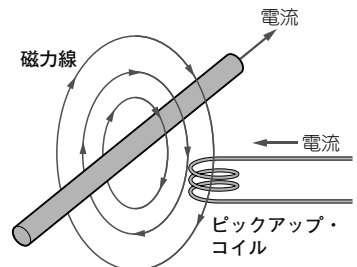
■ 地下鉄に使われている誘導無線

誘導無線は鉄道無線の一部に使われています。地下鉄のような電波の届きにくいところを走る列車は、図2のように誘導架線を設けて、上述した電磁誘導により通信を行っています。写真2は地下鉄の設備例です。

これは誘導無線(IR)と呼ばれます。誘導架線に供給されるRF周波数は、東京の地下鉄では100~275 kHzの長波帯です。基地局と車両で周波数を変えることで



〈写真1〉紙の裏に張った電線に沿って進む誘導無線トレース・カー



〈図1〉導線に電流を流したときの磁界のようす



第18章 電池なしで 模型のドクターイエローが走る!

IHモジュールを転用した WPTプラレール走行実験

市販IHモジュールを RFエネルギー源に転用する

近年、電線を使わない無線電力伝送“WPT”(Wireless Power Transfer)の技術が著しく進歩しています。この背景には、MOSFETをはじめとするパワー素子の進歩と、ZVSなどの低損失/高速スイッチング回路の発展があります。

電子工作におけるWPTの醍醐味は、電池なしで動く装置が作れることです。しかし、モータのようにインピーダンスが低くて、電力を消費する負荷をWPTによって駆動することは容易ではありません。

受電側は、ある程度の電磁気の知識が求められますが、回路は簡単です。しかし、送電側は設計製作に多くのノウハウが必要だと思います。

なんとか既製品をうまく使ってWPTを手軽に実験できないかと調べていたところ、Amazonなどで数百

円以下で売られていて入手容易であり、しかも扱いやすいIH(誘導加熱)電源モジュールが出回っているのを見つけました。これをRFエネルギーの送電に使えば、簡単にWPTを実験できそうです。さっそく送料税込みで800円を切る最安値のものを入手しました。小型ながら、負荷コイルに数W~数十Wの電力を大きな発熱なしに効率よく送り込むことができます。

受電側の駆動対象としては、これも入手が容易な模型のプラレール [株]タカラトミー]の電車、ここでは「ドクターイエロー」(写真1)と呼ばれる新幹線の軌道/架線検査車を選びました。

製作するWPTドクターイエローは「電池なし」で動きます。また、送電エネルギーを変換することによって、発進/停止はもちろん、走行スピードも遠隔制御できるので、展示デモに打ってつけだと思います。さらに、受電周波数を変えた2種類の電車を別々に制御するなどの応用も考えられます。教育現場での



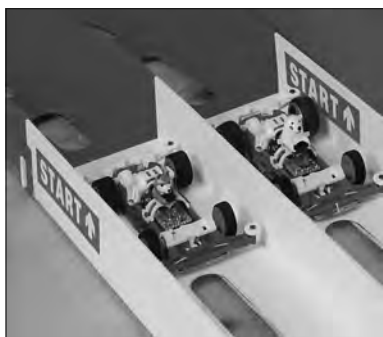
〈写真1〉IHモジュールを使った走行中給電で走行するWPTプラレール



〈写真2〉実験に使った誘導加熱 (IH) モジュール

第19章 サーキット路面から 2台に走行中給電する!

IH電源モジュールを使った WPTミニ四駆同時走行の実験



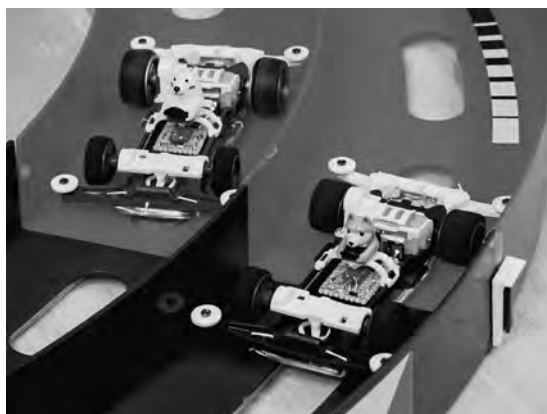
エレクトロニクスを使った乗用車の自動運転技術が実用化されつつあります。一方、動力については、地球環境保護のために、内燃機関から電気モータへの切り替えが急速に進んでいます。重い充電式電池を搭載せずに、走行エネルギーを車外から直接得る試みも始まっています。(1)

近年、発達の著しいWPTWireless Power Transfer(無線電力伝送)技術を使って、道路面下に敷設したコイルから、車両側のコイルに電力を伝送する方法がその一つです。

規模はとても小さいですが、模型のミニ四駆を同じ原理で走らせると、電池が不要になるだけでなく、電気モータを外部から制御できるようになります。これにより、レーシング・カーの同時スタートが実現でき、電池重量のぶん軽くなるのでパワー・ウエイト・レシオも改善されます。搭載する電池容量のばらつきによるハンディも無くなります。これらの結果、WPT回路形式やタイヤ調整などのチューニングが勝敗につながるようになり、レースが面白くなります。

今回、ミニ四駆を走らせるための、オーバル・コース(楕円状コース、写真1)を入手し、コース下に設けた平行線コイルから、WPTによって給電し、2台のミニ四駆車を走らせる実験をしました。

送電側は入手容易で安価な市販IH電源モジュール(Amazonで800円ぐらい)を使いました。動作周波数



〈写真2〉 WPTミニ四駆2台によるカー・レース

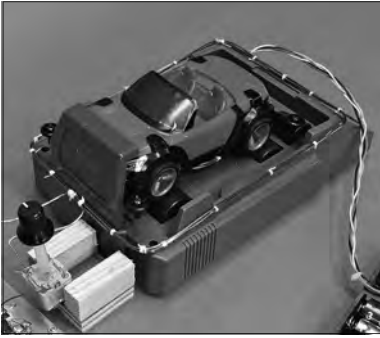
は約100 kHz、DC入力電源1個あたり約16.8 W、受電電力は1台あたり約3 Wです。こうして、写真2のようなWPTカーレースが、予想以上の迫力で実現できました。このWPT車は電池が不要なので、そのスピードはアルカリ乾電池走行車を凌ぎます。走行するようすをRFワールドのウェブ・サイトでご覧いただけます。



〈写真1〉 ミニ四駆オーバル・サーキット(タミヤ、ITEM 94893)

第20章 電波のパワーで、ミニ四駆を バッテリーレス駆動してみよう！

ATAC方式ワイヤレス電力伝送の実験 前編：最大6 MHzで動作するATAC-RF電源の製作



はじめに

Wireless Power Transmission

このところワイヤレス電力伝送(WPT)が脚光を浴びています。そのきっかけとなったのが、MIT(マサチューセッツ工科大学)のM. Soljacicらが2007年に行った、数MHzの電波を使った伝送実験⁽¹⁾です。約2m離れた受信コイルで、60Wの電球を点灯させることに成功したのです。

ワイヤレス電力伝送は、従来から電気かみそりや電動歯ブラシの充電などに広く使われてきました。これは二つのコイルの間の電磁誘導を利用したもので、原理的にはトランスと同じです。MITの実験は、コイルとコンデンサの共振を利用した「磁界共鳴」と呼ばれるもので、コイルどうしの単なる電磁誘導ではありません。使われる周波数も数MHzと高く、Qの高い共振回路を使うことが特徴です。

共振を利用する場合、RF電源の周波数に対して、送電側共振回路の共振周波数と受電側共振回路の共振周波数を一致させる必要があります。しかし、Qが高いと共振カーブが急峻になり、負荷や距離の変化によって共振周波数が変化するので、一致させることは至難の技です。

そこで、共振周波数の調整を自動化する種々の方法が提案され、実用化されています。その多くは、受電側に検出回路を設けておき、これを送電側にフィードバックするものですが、回路が複雑なのが難点です。

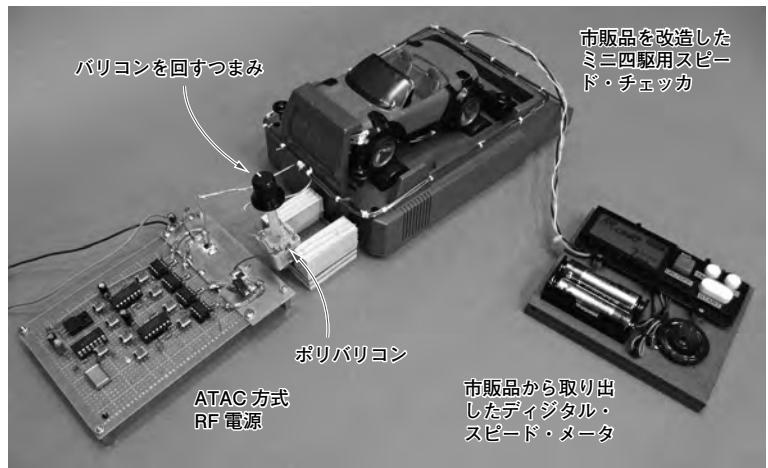
これに対して、参考文献(2)で紹介されたATAC方式⁽²⁾を使えば、特に同調機構や制御回路を設けなくとも自動同調できるので、小規模の電力伝送にはうってつけです。この回路を使って、ミニ四駆をバッテリーレスで動作させてみたのが写真1の試作機です。

前編ではATAC方式の原理を説明し、送電回路を製作して疑似負荷による測定結果を紹介します。後編(次章)では、受電回路を製作して効率を測定し、ミニ四駆のモータへワイヤレス給電する実験を紹介いたします。

ATAC方式について

■ ATAC方式の原理

ATAC方式は、(株)アドバンテストの古川靖夫氏らが発明した純電子式の共振周波数自動調整回路⁽²⁾で、これを応用したWPTシステムは“AirTap”と名付けられました。



〈写真1〉ATAC方式によるミニ四駆のワイヤレス給電実験(スピード・メータは市販品の一部だが、送電コイルの電磁界によって誤動作するので外部に取り出した)



第21章 電波のパワーで、ミニ四駆を バッテリーレス駆動してみよう！

ATAC方式ワイレス電力伝送の実験 後編：ミニ四駆のワイレス駆動実験

前章では、従来のフル・ブリッジ回路(非 ATAC)と、新技術である ATAC 回路を広帯域カレント・プローブと広帯域オシロスコープを使って比較/測定し、共振点の位相変化のようすを観測しました。その結果、ATAC 回路では、共振点がほぼロックされることが確認できました。

本章では ATAC 方式の送電回路を使って、実際に模型のミニ四駆に受電回路を装備して、モータを遠隔駆動し、スピード・チェッカにより動力性能を調べます。また、ベクトル・ネットワーク・アナライザ “ziVNAu” (DZV-1) を使って、 kQ 積と効率を測定します。

ワイレス電力伝送システムの検討

■ 送受電コイルの巻き数, 直径, 形状の決定

ワイレス電力伝送をするときに、送電コイルと受電コイルの間の距離を伸ばすには、どうすれば良いのでしょうか？ 送受電コイルの直径や形状は、エネルギー伝送の効率にどのように影響するのでしょうか？ コイルに使う導線の太さも気になります。

写真1は、今回の実験に使ったコイルです。外側が送電コイル、内側が受電コイルです。6 MHz にお



〈写真1〉送電コイルと受電コイル(6 MHz 用の場合、 $kQ = 11$, $\eta_{\max} = 86\%$)

る kQ 積は 11, 最大効率は 86 % でした。

■ kQ 積はワイレス電力伝送の性能指標

コイル間の結合は一般に、相互インダクタンス M や結合係数 k で評価します。ワイレス電力伝送では、伝送効率 η を決定する最大要因として、結合係数 k に加えて、コイルの Q をも考慮した「 kQ 積」が評価の指標になります。(1)

ワイレス電力伝送の伝送効率 η は、負荷(整流回路とモータ)のインピーダンス Z_L に依存します。ここで効率 η が最大になる最適負荷に選んだときの効率は最大効率と呼ばれ η_{\max} で表します。

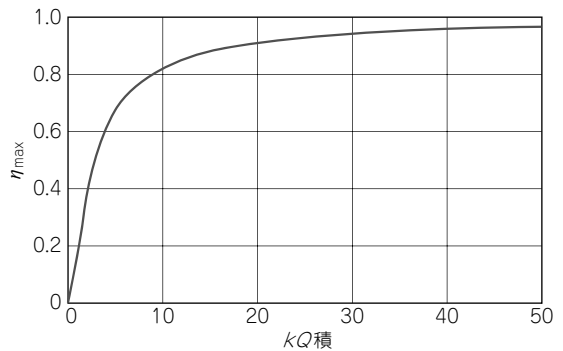
kQ 積に対して η_{\max} は図1のように変化します。 $kQ < 10$ の範囲では η_{\max} が急激に変化します。結合係数 k が小さくても、 Q を大きくすることで急激に効率が改善されることがわかります。

■ kQ 積を大きくして効率をよくする方法は？

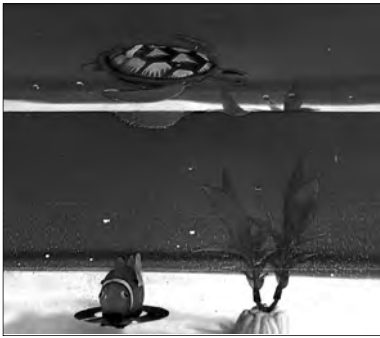
では、 kQ 積を大きくするにはどうすれば良いのでしょうか？ 今回のような磁界結合では、次式が成り立ちます。(1)

$$kQ = \frac{\omega M}{R} \dots\dots\dots (1)$$

ここで $\omega = 2\pi f$ は角周波数、 M は相互インダクタンス、 R は直列抵抗です。式(1)から、周波数を高く、



〈図1〉 kQ 積と最大伝送効率 η_{\max} の関係



第22章 熱帯魚や海亀が本物そっくりに動く 電動アクアリウム

水中ワイヤレス電力伝送で泳ぐ WPTロボフィッシュの実験

1 製作の動機

熱帯魚や金魚などがおおらかに泳ぐ姿を見ていると、疲れた気分やストレスが和らぎます。家庭などでベットとして熱帯魚や金魚を飼育する場合、相手が生物だけに、餌やりや清掃だけでなく、酸素補給や健康状態の管理など、予想以上の苦勞を伴います。

単なる鑑賞だけならば、泳ぐようすを映したLCD画面やロボットによる代用手段が存在します。

最近、模型の魚や亀の中にモータと電池を組み込んだ「光るロボフィッシュ」や「ロボタートル」などと呼ばれるおもちゃが、㈱タカラトミーアーツから発売されており、1,500円前後で買うことができます。その電源はボタン型アルカリ乾電池(LR44×2個)です。ボタン電池は容量が小さいため、連続使用するとすぐ電池交換が必要になります。また、市販のロボフィッシュには、電池節約のため数分で動作が停止するオート・スリープ機能が組み込まれており、一度止まると、水から取り出して乾かしてから再び水中に入れたり、振動を与えたりして再起動する必要があります。

ボタン電池の寿命が短いことから、交換の手間もさることながら、ロボフィッシュを鑑賞していても、電池を無駄遣いしているような後ろめたさがある、ストレスを感じてしまいます。

最近ではWPT(ワイヤレス電力伝送)技術が著しく進



〈写真1〉水中WPTによって元気に泳ぐロボフィッシュ

歩していることから、電池の代わりに、外部からの電磁エネルギーでロボフィッシュを動かようにはできないだろうかと考えました。果たして水中でもRFエネルギーを効率よく伝送可能でしょうか？

今回はこのテーマにチャレンジし、 kQ 積による動作検討のうへ、ATAC方式RF電源⁽¹⁾の使用などによって好結果が得られましたのでご紹介します。写真1はWPTによって元気に泳ぐロボフィッシュです。水槽に巻いたコイルで送電し、腹部に装着したコイルでRFパワーを受電する仕組みです。

2 水中ワイヤレス電力伝送の検討

2.1 水中電力伝送の kQ 積

● 水中におけるRF周波数による電磁誘導

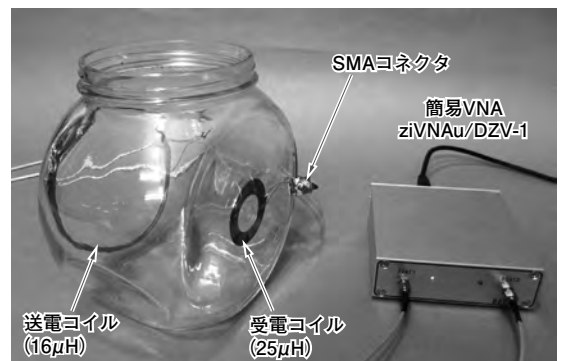
HF帯周波数を使って数十cmの距離でエネルギーを送電する場合、送電コイルから受電コイルが受けるエネルギーは電波ではなく、電磁誘導によるものです。

● ガラス容器の外壁に送受電コイルを

設けた場合の kQ 積

kQ 積⁽³⁾は結合係数 k と品質係数 Q を乗じた値です。 kQ 積は電力伝送効率の指標であり、その値が大きいほど高効率で伝送できることを表します。

写真2のように、ガラス容器の外壁に二つのコイル



〈写真2〉ガラス容器の外側に対向して送電コイルと受電コイルを取り付ける

第23章 10.525 GHzの安価なマイクロ波送受信モジュールNJR4178Jを応用

ドップラー・センサを使った スピード・ガンの製作

製作したスピード・ガンの概要

マイクロ波は、電子レンジ、携帯電話などに幅広く利用されています。一般にマイクロ波の機材は高価で、入手も困難であり、基本的な実験ですら敬遠されがちです。そこで今回は入手が容易で、しかも安価なマイクロ波ドップラー・センサ・モジュールを利用して、数字と音で対象物の速度を表示できるスピード・ガン(写真1)を作ってみました。

マイクロ波を使ったスピード・ガンは、ドップラー効果を利用した速度計であり、野球のピッチャが投げる球速の測定、交通違反の取り締まりなどに使われています。このほか、液体の流速や、工場ラインの搬送速度監視など、産業分野にも広く使われています。しかし、いずれも非常に高価(数万~数十万円以上)であり、入手は容易ではありません。本稿は5,000円程度で製作できて、実用性のあるものを目指しました。とはいえ、本格的な測定器に代わるものではなく、ゴルフやテニスの素振り速度の測定や、工程の簡単な速度監視などに使うことを前提としています。

図1が製作したスピード・ガンの概要です。このドップラー・センサ・モジュール(以下、モジュール)には、送信機と受信機が組み込まれています。送信機



〈写真1〉 バドミントン用ラケットの素振り速度を測定中の本機

から出た電波がボールなどの対象物に当たり、これが反射して同じモジュール内に組み込まれた受信機に入ります。モジュールの出力は、送信周波数と受信周波数の差の周波数を持った信号です。

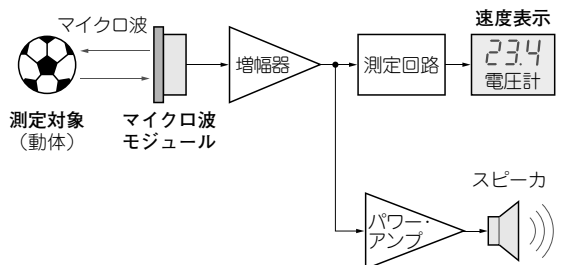
対象物が動いていると、ドップラー効果により、その速度に比例して周波数が変わります。この信号を増幅してスピーカを鳴らせば、音の高さから速度を判別できます。また、周波数に比例した電圧に変換してテスタなどの電圧計に速度を表示しています。

ドップラー効果とは

近づいてくる救急車のサイレンは高い音で聞こえ、遠ざかると低く聞こえます。このような現象をドップラー効果と呼んでいます。

今、図2のように、動いている反射物X(ここではボール)のまえに、静止している波源S(周波数 f_t Hz)があるとします。ボールが一定の速さ v m/sでSの方に近づいているとき、ボールからの反射波の周波数 f_r Hzは次のようにして求められます。

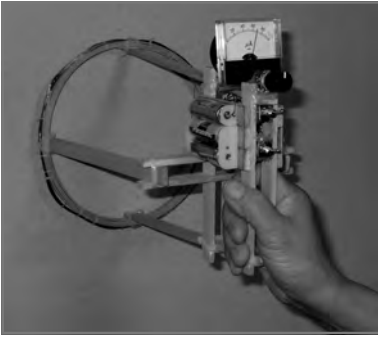
今、波の速度を c m/sとすると、点 A_0 で反射した波は、1秒後には距離 c mだけ進んで点Bに到達します。その間にボールXは距離 v mだけ進んで点Aにきます。したがって、反射した波はA~B間つまり距離 $(c-v)$ mの間に押し縮められます。また、この1秒間に点 A_0 に達した波の数は、



〈図1〉 製作したスピード・ガンの構成(速度表示だけでなく、ドップラー・シフト音を聞くことができる)

第24章 PLL-IC 74HC4046Aと ループ・コイルを使った

金属探知器の製作

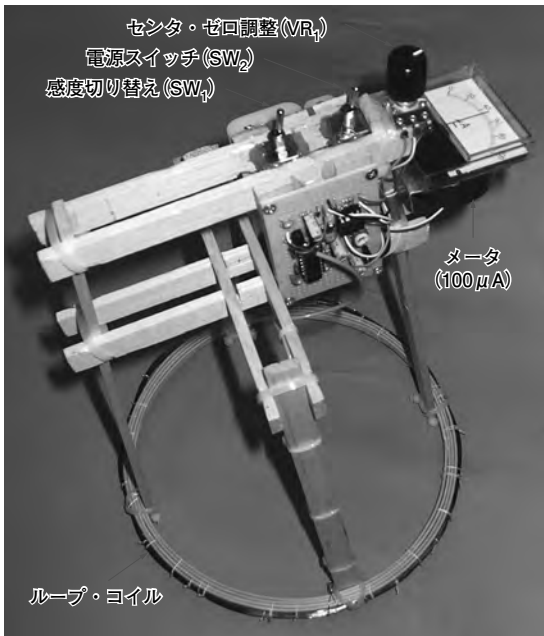


はじめに

通信以外の分野でのRF信号の応用としては、医療機器、検査機器、探査機器など多くの分野があります。中でも古くから実用化されている装置の一つが金属探知機です。このうち、ループ・コイルと発振器を組み合わせたものは、歴史が古く数々の実例があります。

最近、外観からは金属かプラスチックかわからない材料を数多く見かけるようになりました。また、壁や天井の中の電気配線がどこを走っているのか、コンクリートの中に鉄骨が入っているのか、なども目で見ただけではわかりません。そんなときに金属探知機があれば、ある程度の判断ができます。

金属探知機は、探査範囲が狭いものであれば、写真1のように、簡単な回路製作と、ちょっとした工作で実現できます。



〈写真1〉 製作した金属探知器の外観

製作した金属探知機の動作原理

コイルに高周波電流を流すと、周囲には図1(a)のような磁界が発生します。コイルに流れる電流を iA 、コイルを横切る磁束数を Ψ Wb とすれば、コイルのインダクタンス LH は、次式で表されます。

$$L = \frac{\Psi}{i} \dots\dots\dots (1)$$

今、コイルの近くにアルミニウムや鉄のような金属があると、図(b)のように、金属表面に渦電流が発生します。少し難しくなりますが、マクスウェルの方程式から、渦電流を $J A$ とすると、

$$\text{curl } J = -\sigma \left(\frac{\partial B}{\partial t} \right) \dots\dots\dots (2)$$

が成り立ちます。ここで、 σ は導電率 [S]、 B は磁束密度 [Wb/m²] です。curl J はベクトル J の回転を意味し、rot J または $\nabla \times J$ と書くこともあります。curl は J の回転方向の微分演算子です。なお、太字はベクトルを表します。

この式の意味は、導電体中の磁束密度 B が時間的に変化すると、電磁誘導によって、磁束の回りに電界 E の渦 curl E が誘起され、回転電流 $J = \sigma E$ が流れるということです。

式(2)から渦電流 J の大きさは、磁束 B の時間的変化割合、つまり周波数 f Hz に比例することがわかります。

渦電流は、磁束の変化を妨げる方向に流れるので、図(b)のように、磁束が打ち消されて、コイルを横切る磁束数 Ψ が減少します。したがって、式(1)からコイルのインダクタンス L が減少します。

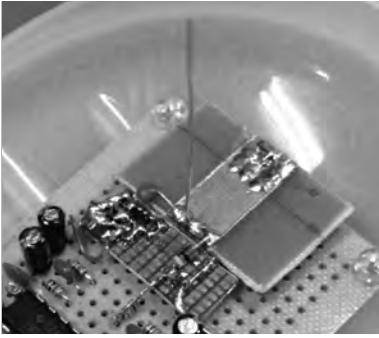
次に図(c)のようにコイルの近くにフェライトのような強磁性体を置いた場合を考えます。フェライトは $Mn_2Fe_2O_4$ のような絶縁体の磁性体粉末を焼結したものですから、渦電流は流れません。この場合の磁束密度 B Wb/m² は、

$$B = \mu H \dots\dots\dots (3)$$

と表されます。ここで、 μ は透磁率 [H/m]、 H は磁

第25章 マイクロストリップライン共振器を使った

UHF帯ドップラー動体センサの製作



■ 人や物の動きを検出するセンサ

● 反射波のドップラー効果を利用する

人間や動物のわずかな動きを検出するセンサは「動体センサ」「人感センサ」「近接センサ」などと呼ばれています。動作原理としては、赤外線を検出する焦電センサを使ったものが広く普及していますが、このほかに電波の反射に伴うドップラー効果を利用したものがあります。電波の場合はUHF帯からセンチメートル波の周波数を選ぶと比較的良好な結果が得られます。

しかし、周波数が1 GHz以上に及ぶので、高周波回路の設計や実装が少々難しくなります。また、汎用オシロスコープでは発振波形を見ることすらできず、専用測定器がないと正確な発振周波数もわかりません。

一方、GHz帯になると波長が短いので、マイクロストリップラインや同軸ケーブルを共振器として使うことができるようになります。形状が単純で、寸法も数cm程度ですから作りやすく、設計図と同じ寸法にすれば、ほぼ同じ周波数の発振器を作ることができます。

そこで、今回はマイクロストリップライン共振器とトランジスタで発振回路を構成し、これを使ってドップラー動体センサ(写真1)を作ってみます。

極超短波の世界は、波長の長い中波や短波の世界から見れば、ミニチュアの箱庭のようなものです。共振器やアンテナが小さく作れるので、工作がしやすく、考えようによっては親しみやすい分野でしょう。

● ドップラー効果

ドップラー効果は、通り過ぎる救急車のサイレンの音程変化で身近に体験します。救急車が近づいてくるときは高く聞こえ、遠ざかるときは低く聞こえます。電波も同様で、観測者から物体が遠ざかる場合、電波の波長は伸び、近づく場合は縮まるように観測されます。つまり、対象物が動くと反射波の波長が変化して見えます。ドップラー効果は、野球のピッチャーが投げるボールの球速測定や、スピード違反の取り締まりにも使われています。

今、図1のように発振周波数 f_t の静止した発信源G

があって、物体Aが速度 v で発信源Gへ近づく場合、物体Aから反射して戻ってくる信号の周波数 f_r は次式で表されます。

$$f_r = \frac{c+v}{c-v} f_t \dots\dots\dots (1)$$

ただし、 f_t : 信号源の周波数 [Hz]、 f_r : 反射波の周波数 [Hz]、 v : 物体Aの速度 [m/s]、 c : 電波の速度 (3×10^8) [m/s]

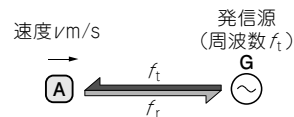
f_r と f_t の差の周波数 f_d は、次式で表されます。

$$f_d = f_r - f_t = \frac{2vf_t}{c-v} \dots\dots\dots (2)$$

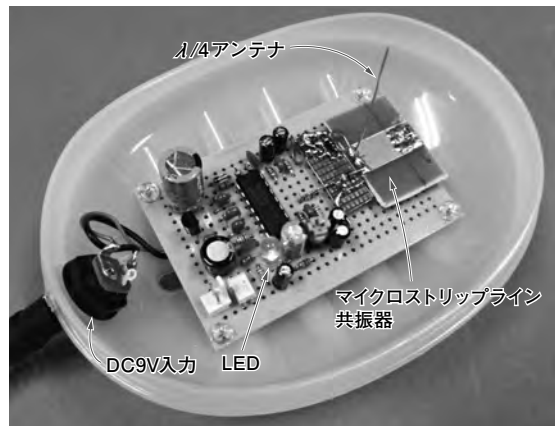
ここで $c \gg v$ ですから式(2)は、

$$f_d \approx \frac{2vf_t}{c} \dots\dots\dots (3)$$

と表せます。 f_d は「ドップラー・シフト」と呼ばれます。たとえば $f_t = 1.6$ GHz、 $v = 3$ m/sのとき、



〈図1〉物体Aが速度 v で発信源Gへ近づく場合



〈写真1〉製作したドップラー動体センサ(近くに動く物体があるとLEDが点滅する)



第26章 中波帯の空電を捕らえる！ 夏場の野外スポーツやハイキングの用心棒

雷ディテクタの製作

梅雨明けとともに、晴れ間が続き暑くなると、入道雲がニョキニョキと昇り、雷のシーズンが到来します。部屋の中に閉じこもっていても、雷様も何とか通り過ぎてくれますが、野外だとそうはいきません。とくに、ハイキング、山登り、ゴルフ、セーリングのように近くに避難場所が少ない場合は、とても危険です。

ゴロゴロと鳴る前に、雷雲が近づいたことを予知できるような雷ディテクタがあれば、避難のために十分な時間を取ることができるでしょう。

そこで、雷が発する電波を検出して、雷が近づいたことを知らせる「雷ディテクタ」(写真1)を作ってみましょう。光と音で警告し、メータで落雷に伴うパルスの積算量を表示します。

■ 雷の基礎知識

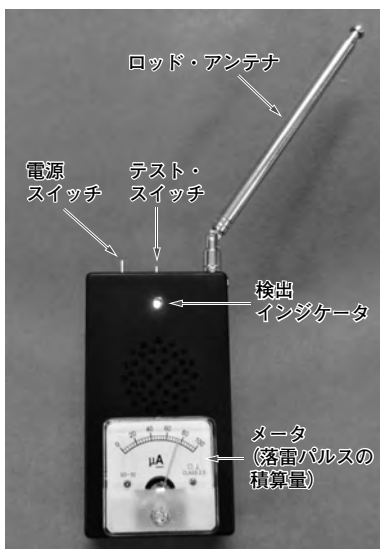
● 雷の原因

雷は、雷雲(積乱雲など)の中で作られた電荷の放電現象であることは、フランクリンの凧の実験などでよく知られています。

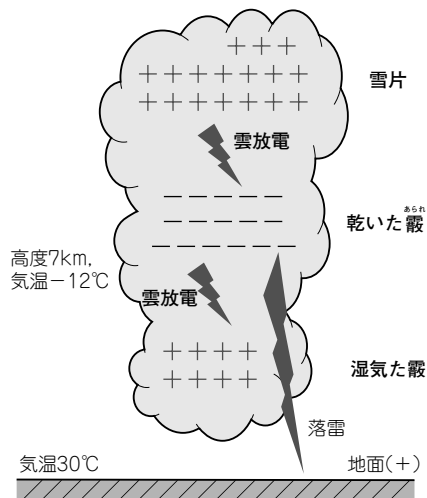
雷雲内にどのようにして電荷が蓄積されるのかは、現在でも完全には解明されていません。夏季に発生する上昇気流による雷については、最近の研究によれば次のように説明されています。

まず、低温(-15~-10℃)で適度に乾燥した条件の下で、霰あられが雪片と衝突すると、+イオンの移動が起こり、霰は負に帯電します。上昇気流により雷雲が発達すると、雷雲内の電荷分布は上記の過程を経て図1のようになります。雷雲にある程度電荷が蓄積されると、放電が始まります。放電の開始は電荷10C以上、電界強度3000kV/m程度と考えられ、雲放電または対地放電となります。

夏季では地上約7kmの負電荷が、大地に誘導される正電荷と中和する負極性の落雷となります。これに対し、冬季は地面を6℃とすれば、負電荷の存在する高度は3km程度となるため、負に帯電した霰は地上に落下するようになります。この結果、図1の最上部の正電荷と地上との放電が多くなり、正極性の落雷となります。因みに放電開始電界強度は、正電荷の方が



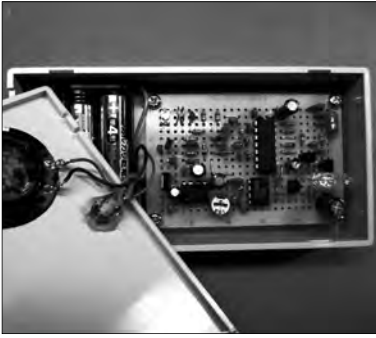
〈写真1〉製作した雷ディテクタ



〈図1〉(2)夏季における雷雲内の電荷分布(多くは三重極構造となっている)

第27章 LFとUHFに対応し、キーと自動車の両方の電波を検出できる！

簡易スマート・キー・チェッカの製作



はじめに

■ 自動車の無線式リモコン・キーがスマート・エントリに進化しつつある

自動車のキーが、機械鍵からボタン式のリモコンになって久しくなります。自動車のリモコン・キー・システムは、リモコン・キーのボタンを押すことで、キーに内蔵された送信機から無線信号を出し、自動車側の受信機がこれを受けて、ドアをロック、アンロックするもので、「(リモート)キーレス・エントリ」などと呼ばれています。

最近ではもっと便利になり、キーをポケットやカバンに入れたままで、車の施錠、解錠、エンジン・スタートなどができる、スマート・エントリ・システムに変わりつつあります。

■ 製作のきっかけは、スマート・エントリ・システムの故障診断から

スマート・エントリは、従来のリモコン・キーと比べればとても便利なのですが、システムが複雑なため、ほかの電子システムと同様に、いったん動かなくなると、故障診断は容易ではありません。



〈写真1〉製作したスマート・キー・チェッカの外観

先日も、自動車整備工場を経営する友人が、お客様の車のドアが路上でロックして開かなくなり、駆け付けたが、キーが悪いのか、車が悪いのか判別できず、対応判断(キーの修理かレッカー移動か)に苦労したとっていました。そして「キーの電波が出ているかどうかかわれば良いのだが…」とのこと。

調べて見ると、このようなときに役立つ、自動車用のキー・チェッカの市販品があります。外観は周波数カウンタの体裁で、とても廉価ではありますが、やや感度が低いこと、変調の有無がわからないこと、スマート・エントリの車両側電波がチェックできないことなど、もう少し改良の余地がありそうです。一方、本格的なチェッカはとても高価で、一般の整備工場に備えるには無理があります。

このような背景で、スマート・エントリの電波を音と光で確認できる「スマート・キー・チェッカ」(写真1)を製作してみました。

自動車の整備士だけでなく、私たちマイカーのユーザーにとっても、ドアのロックがらみの故障のときは、原因特定の判断材料となります。また、ふだんでも、キーの電池消耗チェックや、キーの周囲にある金属などによる電波の影響や車体側電波の有効範囲チェックなどに役立つと思います。

スマート・エントリ・システムの動作と仕組み

■ スマート・エントリの動作

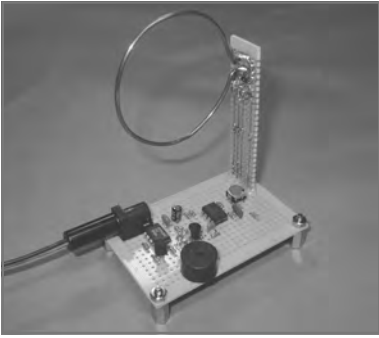
スマート・エントリ・システムの機能は、次の二つに大別できます。

- (a) リモコン・キーの電波により車両を解錠/施錠する機能
- (b) 車両からの電波により、キーの解錠/施錠動作を起動する機能

(a)は図1のようにキーのボタンを押して解錠/施錠するもので、従来のリモート・キーレス・エントリと同じ動作です。自動車から約20m以内の比較的遠方から操作できるのが特徴です。

第28章 光と音で電波の発射を警告する！

携帯電話の電波ディテクタの実験



3G 携帯電話の発信を検知したい

携帯電話の普及とともに、サービス・エリアが拡がり、どこでも通話ができるようになりました。便利になった反面、教室や病院などの携帯電話を使ってはならない場所で、無意識にってしまう恐れがあります。

医療機器や心臓ペース・メーカは、微弱な電波でも誤動作が起こる可能性があります。これは人命にかかわることですから、十分な配慮が必要です。また、入試会場で携帯メールを使った不正行為も発覚しています。

このような背景から、携帯電話の電波を検知し、警報する装置が市販されています。しかし業務用だけに、かなり高価です。簡単に製作できれば応用範囲も広がると思います。

第2世代携帯電話が主流だった頃、携帯電話のアンテナに電線を巻き付けて、電波が出たときにLEDを点灯させる実験がありました。しかし、携帯電話が進歩して第3世代(3G)になり、送信出力が基地局からの制御によって必要最小限に絞られるようになったことで、この実験も最近は難しくなってきました。簡単な回路で同じような実験はできないのでしょうか？

昔から、盗聴器を発見するための「バグ・ディテクタ」と呼ばれる非同調の広帯域受信機がありますが、このようなタイプの受信機なら、3G/4G携帯電話の電波を検知できるかもしれません。そこで、高周波と通信の勉強を兼ねて、簡単な構成の電波検出器(写真1)を製作してみました。

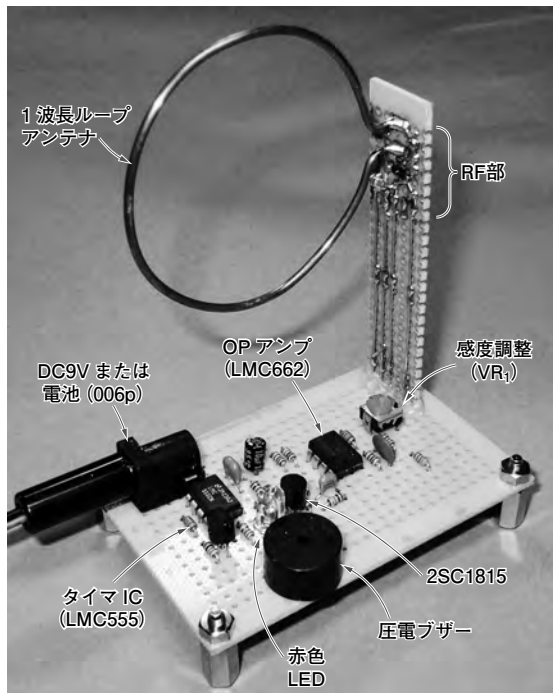
携帯電話で使われている周波数帯は？

現在の携帯電話の音声はデジタル方式なので、通話内容を傍受することはできません。しかし、電波を使っていることは間違いないので、電波の有無を検出することは可能です。

では、携帯電話はどのような周波数帯域を使っているのでしょうか。表1を見てください。

■ 3G/4Gでは800 MHz～3.5 GHzが使われている

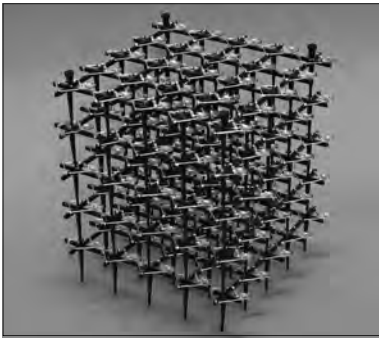
第1世代(1G)は初期の携帯電話で、アナログ変調方式であり、800 MHz帯を使っていました。第2世代(2G)はPDCとも呼ばれ、デジタル方式(TDMA)となり、低速ながらインターネット接続も可能になりました。



〈写真1〉 製作した携帯電話の電波ディテクタ

〈表1〉 携帯電話などで使われている主な周波数

周波数帯	主な携帯電話事業者
800 MHz帯	NTTドコモ, au
1.5 GHz帯	NTTドコモ, au, ソフトバンク
1.7 GHz帯	NTTドコモ, au, ソフトバンク, 楽天モバイル
2.0 GHz帯	NTTドコモ, au, ソフトバンク
3.5 GHz帯	NTTドコモ, au, ソフトバンク



第29章 電子レンジ内の電界分布を LEDの光でリアルタイムに観察できる！

光る立体型電磁界モニタの製作と実験

■ はじめに

電磁波を使った製品の中で、電子レンジは私たちの生活にとっても身近なものです。冷めた料理や食品を温める、牛乳を温める、お酒の燗かんをするなどはお手のもの、今では冷凍食品の解凍やインスタント食品の調理などに必須のアイテムとなりました。

電子レンジは食品を外部から温めるのではなく、波長の短い電磁波を照射して、分子どうしの摩擦を起こして、内部から温めることが特徴です。この特性を活かして、電子レンジ(マイクロ波オーブン)は、家庭用以外に、食品や木材、繊維などの乾燥、接着作業などの工業用、さらに医療、研究用に広く使われています。

さて、電子レンジの中で、電磁波はどのようにふるまっているのでしょうか？ 電波の強度は一定なのでしょうでしょうか？ 電波は常に出ているのでしょうか？ それとも時々出るのでしょうか？ 電波の強さは場所によって変わるのでしょうか？ 電波は目に見えないので、こういうことは皆目見当が付きません。

そこで、ダイオード検波器、抵抗、LEDをループ状にしたもの(レクテナ素子)を平面や立体に多数並べ

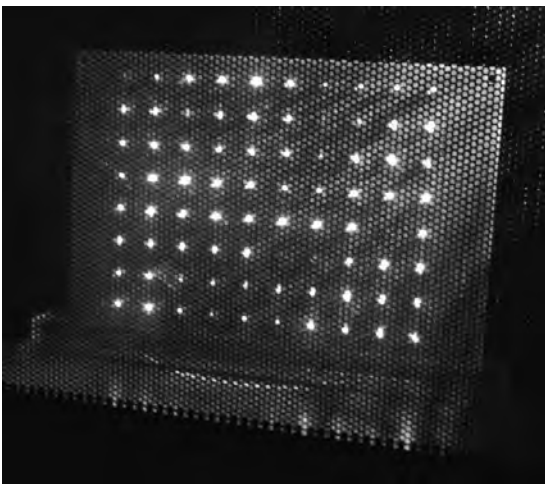
て、電子レンジの中の電磁界のようすを調べてみたのが写真1と写真2に示す電磁界モニタです。各LEDの明るさは、電波の強度に応じて変化します。各々のレクテナ素子は、安価な汎用部品で構成したので、素子1個でも実験できますし、手間暇を惜しまなければ、ロー・コストで多素子からなる電磁界モニタを作ることができます。

なお、「レクテナrectenna」とは整流器rectifierとアンテナantennaを組み合わせた造語で、マイクロ波電力伝送ではおなじみの用語です。

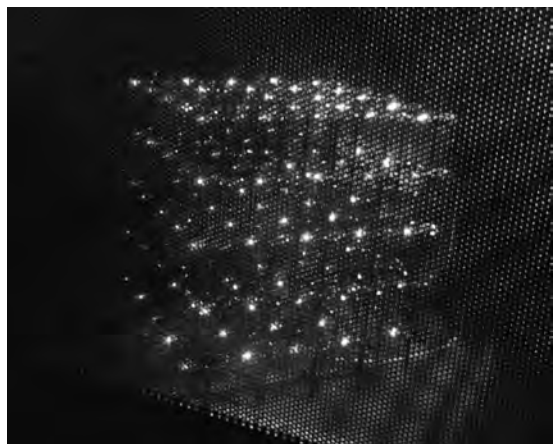
■ 電子レンジの発明と動作原理

● 電子レンジによる加熱の原理

1945年、米国レイセオン社のパーシー・スペンサーPercy Spencerらは、マグネトロンを使ったレーダー装置の組み立て中に、動作中のレーダーの前に立っていたらポケットに入れていたチョコレートが柔らかく溶け始めることに気づきました。マイクロ波により食品が加熱されることが発見されたのです。その後、レイセオン社はこの現象を利用して電子レンジを商品化しました。(編注；文献(2))



〈写真1〉製作した平面型電磁界センサ(明るい部分と暗い部分が時間的に変化する)



〈写真2〉製作した立体型電磁界センサ(明るい部分と暗い部分が時間とともに空間的に変化する)



第30章 電界&磁界アンテナによって 水平偏波のFM放送波の到来方向を探る!

電波方向探知器の実験

はじめに

電波の到来方向を探知するのに、ホイップ・アンテナとループ・アンテナを組み合わせた方法があります。GPSナビがなかった当時、船舶や航空機の電波航法の一つとして、中波ラジオ放送局や中波ラジオ・ビーコン局の位置を頼りにする方法がありました。港に行くと、現在でも直径数十cmのループとホイップを組み合わせた方探アンテナを装備した船舶を見かけます。また、1960年代に入ると米陸軍などの兵士が前線から基地へ帰投するために、携帯型方向探知用アンテナを使うようになりました。これはVHF帯を使ったもので、中波帯と同様に垂直偏波の発信源の位置を探るものでした。

本稿では、動作原理を学ぶため、方向探知器を試作・実験していただきました。この方式の対象としては中波ラジオ送信所が一般的ですが、ここではFM放送局の方向探知に挑戦していただきました。当初、FM局の多くが水平偏波であることを失念していて、筆者の漆谷さんにはお手数をおかけしてしまいました。しかし、本稿でご紹介いただくように、この方式によって水平偏波でも電波の到来方向を探知することができることがわかりました。

〈編集子〉

*

本稿では、電波の性質を利用した簡単な方向探知器を製作します。FM送信所やTV局を探して、フォックス・ハンティング(電波の発信源を狐に見立てて探す遊び)をして見るのも面白いでしょう。

なお、今回の製作は当初想定していたほど簡単ではなく、種々の検討・変更・改善が必要でした。そこで失敗談を交えつつ、検討経過に沿って紹介しましょう。

電波に関する予備知識

■ 水平偏波と垂直偏波

最初に、本製作に必要な最小限の予備知識について

触れます。電磁波は、前々世紀にマックスウェルが明らかにしたように、電界と磁界が互いに直交して光の速度で伝搬して行く横波です。図1にこのようすを模式的に示します。

図(a)のように電界が地面に平行に伝搬するものを「水平偏波」、図(b)のように電界が地面に垂直に伝搬するものを「垂直偏波」と呼んでいます。この二つが回転しながら伝搬する「円偏波」や「楕円偏波」もあります。

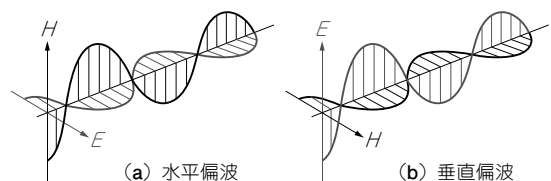
さて、FM放送の周波数は76～90 MHzのVHF帯です。そして大半のFM送信所のアンテナは水平偏波です。

■ 電界アンテナと磁界アンテナ

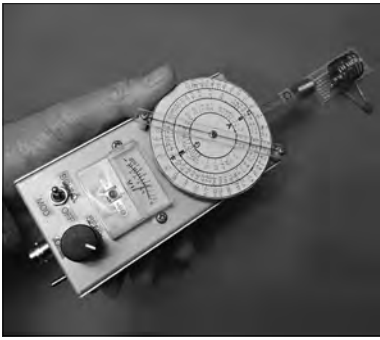
アンテナには、電波の電界成分を検出する「電界アンテナ」と、磁界成分を検出する「磁界アンテナ」があります。前者の代表例がダイポール・アンテナで、ロッド・アンテナもこの仲間です。後者の代表例がループ・アンテナであり、AMラジオに使われているバー・アンテナがこの仲間です。

ダイポールのような電界アンテナは、たいていの教科書に載っており、種々のアンテナの原型でもあります。一方、磁界アンテナはAMラジオのバー・アンテナ以外に見かけることはほとんどありませんし、解説記事も多くはありません。

電界アンテナの原理は、図2のように、電界方向に電線(ロッド)を張ると、電荷が誘起され、高周波の交流電圧として取り出すことができるというものです。また、ループ面に垂直に磁界の変化があると電磁誘導によりループに電流が流れます。これが磁界アンテナの原理です。ループ面を貫く磁束が多いほど誘起され



〈図1〉 水平偏波と垂直偏波



第31章 650 kHz～250 MHzをカバー！ 音でディップ点を見つけられる

多機能ディップ・メータの製作

ディップ・メータは、アマチュア無線家や無線愛好家の間で最も親しまれ、最もよく使われた定番中の定番ともいえる測定機です。回路が簡単なことから、自作する人も多く、CQハムラジオなど、昔の無線雑誌には製作事例がたくさん紹介されていました。半導体時代になってからは、トランジスタやFETを使ったものになりましたが、使い方や原理は同じです。

ディップ・メータは、おもに共振回路やアンテナの共振周波数を測るために使われます。LC共振回路のLかCのどちらかの値が既知であれば、共振周波数が

わかればLやCの値を計算で求めることができます。しかも、共振回路が送信機や受信機に組み込まれた状態で、通电されているかどうかを問わず、それぞれの共振周波数を測ることができるので、調整やチェックに役立ちます。

ディップ・メータの基本的な測定方法は、測定コイルを相手のコイルに近づけて結合させるだけです。非接触なので、被測定回路への影響を最小限に抑えられます。

本稿では、音でディップ点を聞くことができ、変調



〈写真1〉 製作したディップ・メータ

- 本書記載の社名、製品名について — 本書に記載されている社名および製品名は、一般に開発メーカーの登録商標または商標です。なお、本文中ではTM、®、©の各表示を明記していません。
- 本書掲載記事の利用についてのご注意 — 本書掲載記事は著作権法により保護され、また産業財産権が確立されている場合があります。したがって、記事として掲載された技術情報をもとに製品化するには、著作権者および産業財産権者の許可が必要です。また、掲載された技術情報を利用することにより発生した損害などに関して、CQ出版社および著作権者ならびに産業財産権者は責任を負いかねますのでご了承ください。
- 本書に関するご質問について — 文章、数式などの記述上の不明点についてのご質問は、必ず往復はがきか返信用封筒を同封した封書でお願いいたします。勝手ながら、電話での質問にはお答えできません。ご質問は著者に回送し直接回答していただきますので、多少時間がかかります。また、本書の記載範囲を越えるご質問には応じられませんので、ご了承ください。
- 本書の複製等について — 本書のコピー、スキャン、デジタル化等の無断複製は著作権法上での例外を除き禁じられています。本書を代行業者等の第三者に依頼してスキャンやデジタル化することは、たとえ個人や家庭内の利用でも認められておりません。

JCOPY (出版者著作権管理機構 委託出版物)

本書の全部または一部を無断で複写複製(コピー)することは、著作権法上での例外を除き、禁じられています。本書からの複製を希望される場合は、出版者著作権管理機構(TEL: 03-5244-5088)にご連絡ください。

できる無線回路の製作全集

2024年5月1日 初版発行

© 漆谷 正義 2024

著 者 漆 谷 正 義

発 行人 櫻 田 洋 一

発 行 所 C Q 出版株式会社

〒112-8619 東京都文京区千石4-29-14

電話 編集 03-5395-2123

販売 03-5395-2141

定価は裏表紙に表示してあります

無断転載を禁じます

乱丁、落丁本はお取り替えます

ISBN978-4-7898-4139-9

Printed in Japan

編集担当 小串 伸一

DTP 株式会社啓文堂

印刷・製本 三共グラフィック株式会社

本文イラスト 神崎 真理子

ISBN978-4-7898-4139-9

C3055 ¥3200E

CQ出版社

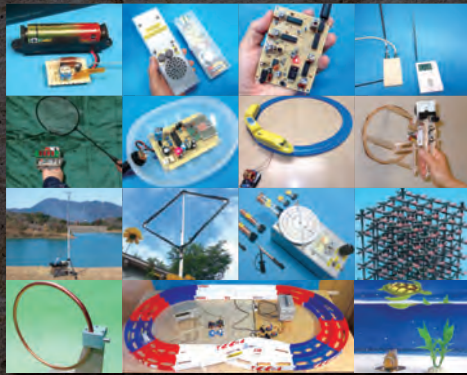
定価 3,520円(本体3,200円)



9784789841399



1923055032002



できる無線回路の製作全集