

マイクロ波の給電線

—特に表面波線路について—

森 協 義 雄・猪 瀬 博

1. 緒 言

電波の利用がさかんになって、長波・中波・短波から超短波(メートル波)までが利用されるようになり、最近では波長 1m 以下(周波数 300 Mc 以上)のいわゆる極超短波も研究の域を脱して、實用通信に利用されるようになった。特にマイクロ波(大體 1000 Mc から 30,000 Mc、波長にして 30 cm から 1 cm の範圍)の技術は戦争中にレーダーその他の兵器に關連していちじるしい進歩を示し、戦後においては近距離通信はもちろんのことであるが、途中に多數の中繼局をおくことにより、遠距離通信にも實用されるようになり、いまや従来の遠距離通信の主流をなしてきた有線通信にとつて代らんとする勢を示している。

マイクロ波はその性質が光に似て、直接見透しのきく場所にしか到達しないから、レーダーや通信などに利用しようとするときには、電波を發射するアンテナを高所におく必要がある。そのためには山や丘を利用するのもよいが、一般には塔をたてて、その頂上にアンテナをおき、送受信機は運用の便宜上塔の下の建物内におくという場合が多いので、送受信機とアンテナを結ぶ給電線が必要になつてくる。

マイクロ波の給電線としては、古くから短波のエネルギーを導くのに用いられている同軸線路(同心の外部導體と内部導體とから成る線路)も使えないわけではないが、十數年前から導波管がさかんに使われるようになってきた(というよりは、導波管およびこれに關連したいわゆる立體回路の特性が明かになるに従つて、マイクロ波の技術が進歩したという方が適切であるかもしれない)。導波管というのは導體でかこまれた中空の管で、その断面の寸法と同程度以下の波長の高周波を傳送することができるものである。これは導體でかこまれているから、同軸線路と同様に外部へ高周波のエネルギーがもれるということがなく、減衰も同じ大きさの同軸管より小さくでき、その他いろいろの長所があるので、波長 10 cm 以下のマイクロ波の給電線としては他の追従を許さないものであつた。

ところが最近表面波線路という新しい形の給電線の特性が研究され、なかなか興味のある性質をもつていたことがわかつてきたので、注目されるようになった。これは1本の被覆導線に沿つて高周波のエネルギーを伝えようとするもので、短い波長の波だけでなく、長い波長の

マイクロ波の給電線としてこれまで使用されてきた導波管について簡単に説明し、次に最近注目されるようになった表面波線路の諸特性を述べ、これについて實驗した興味ある結果をかかげてある。

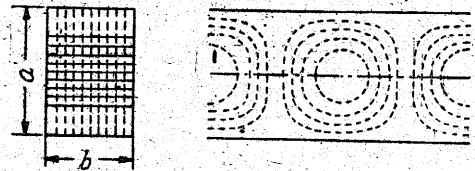
波でも傳送することができるという長所があり、製作や架設も簡単なので興味をひいているわけである。ただ電磁界がかなり遠方までひろがるので、應用の範圍がかぎられることになろう。

以上略述した導波管と表面波線路の特性をもう少し詳しく説明し、筆者の最近の研究結果の概略を紹介することとしよう。

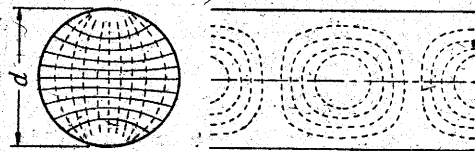
2. 導波管の性質

導波管は中空の導體の管の内部に高周波のエネルギーを傳送させるもので、断面の形はいろいろあり得るが、圓形および矩形断面のものが最も多く用いられている。

自由空間中を進行していく電波が同軸線路中を傳送される波の電磁界は進行方向に垂直な電氣力および磁氣力を有するもので、電氣力線および磁力線はともに進行方向に垂直な平面内にある。ところが導波管中ではこのよ



(a) 矩形導波管



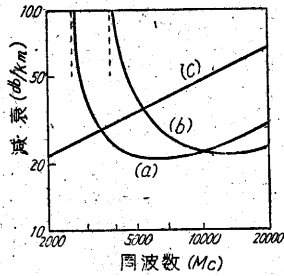
(b) 圓形導波管

第1圖 導波管内の電磁氣力線
實線は電氣力線、點線は磁力線

うな電磁界分布は存在し得ないのであつて、進行方向の電氣力または磁氣力あるいは双方の成分が存在するものになつてくる。第1圖は矩形断面および圓形断面の導波管で最も多く利用されている基本波型の電磁氣力線を示したものである。この圖を見ると、電氣力線は管内の誘電體(通常は空氣)を通つて管壁に垂直にはいつているから、その両端が管壁で短絡された形になつている。し

たがって管壁の長さが波長に比べて十分長くないと工合がわるいであろうということは常識的にも考えられるが、実際にもその通りであつて、(a)の矩形断面の導波管では電気力線に垂直な方向の長さ a の2倍、(b)の圓形断面の導波管では直径 d の1.71倍より短い波長の波だけが伝送可能で、これより長い波長の波は大きい減衰を受けるために伝送されないのである。この $2a$ または $1.71d$ なる波長を臨界波長または遮断波長といい、これに對應する周波数を臨界周波数等といつている。

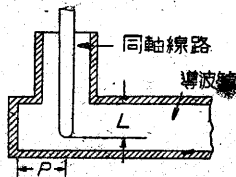
このように導波管は高域減衰特性をもっているが、導波管壁の導電率が有限であるために、臨界周波数より高い周波数でも小さいながら減衰を生ずる。この減衰は壁の導電率の平方根に逆比例するが、壁が銅である場合の減衰と周波数との関係の一例を示せば第2圖のようになる。



第2圖 導波管の減衰特性
(a) 矩形導波管 (5.8×2.9 cm)
(b) 圓形導波管 (直径 4.6 cm)
(c) 同軸管 (外部導體の内徑 4.6 cm)

(減衰が α db であるというは、入力を P_1 、出力を P_2 とするとき、 $\alpha = 10 \log_{10}(P_1/P_2)$ で與えられる値をさすのである。たとえば $P_1/P_2 = 10$ なら $\alpha = 10$ db, $P_1/P_2 = 100$ なら $\alpha = 20$ db となる。) 圖の (a) は第1圖 (a) の矩形導波管で、 $a = 5.8$ cm, $b = 2.9$ cm のもの、(b) は第1圖 (b) の圓形導波管で直径 4.6 cm のもの ((a) と同斷面積) の特性である。いずれも臨界周波数の附近で急激に減衰が減少し、最小値を過ぎてからはほぼ周波数の平方根に比例して増加している。周波数が高くなると基本波型の外に他の波型も傳送域にはいつてきて不都合を生ずるので、実際には減衰が最小になる周波数より幾分低い周波数で使用する。なお圖の (c) は外部導體の内徑が (b) と等しい同軸線路の減衰で、導波管の實用周波数範圍では導波管より減衰が大きいことがわかる。実際には同軸線路では中心導體を支持するための誘電體の損失が加わつて、減衰は一層大きくなる。

マイクロ波の發振器や檢波器に結合する部分には短い同軸線路を使用することが多いが、これを導波管に結合する方法の一例を第3圖に示してある。導波管中に突出する中心導體の長さ L および反射板までの距離 P を適當にしてやれば、ほとんど損失なしに同軸線路から導波管へエネルギーを送りこむことができる。

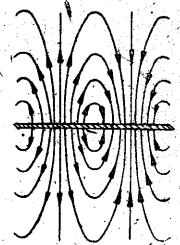


第3圖 同軸線路と導波管の結合

3. 表面波線路

導波管は導體に圍まれた空間 (誘電體) 内に高周波のエネルギーを傳送させるものであるが、これを逆にして導體を中心としてその周圍の誘電體内に高周波のエネルギーを導體に沿つて傳送させるようにしたものが表面波線路である。

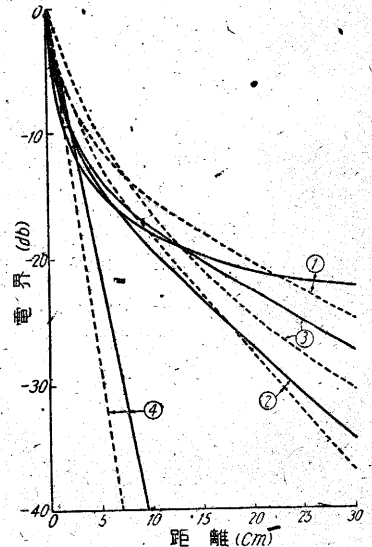
この表面波線路は具體的にいえば、導體の表面を適當な厚さの誘電體でおおつたものであつて、たとえば普通のエナメル線などでもよいのである。導體だけでは電磁界が速方までひろがるために、送端および受端の結合装置のところで大きい輻射損失を生ずるのであるが、適當な厚さの誘電體で導體をおおつてやれば、電磁界が導體の周圍に集中してきて、送受端における損失も少なくなり、また附近の物體から受ける妨害も減少するわけである。



第4圖 表面波線路の附近の電気力線の形

この線路に沿つて傳送される電磁界は進行方向に電氣力の成分を有する波であつてその電気力線は第4圖のような形をしている。したがつて理論的には無限に遠いところまで電界がひろがっているわけであるが、導體からの距離と共に電界の強さが減少する程度は導體の太さ、これをおおつた誘電體の誘電率および厚さ、ならびに周波数によつて異なるのであつて、誘電率が大きく、また厚くおおつてあるほど電界は導體の周圍に集中するのである。

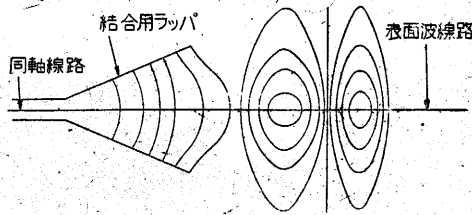
第5圖の實線はその理論値の二三の例 (文献 (2) により計算) を示したもので、ポリエチレンで厚く被覆した線では、導線の附近にかなりよく集中していることがわかるであろう。



第5圖 表面波線路の周圍の電界分布
① 裸線 (直径 2.9 mm) ② エナメル線 (直径 2.9 mm, エナメル厚さ 0.07 mm)
③ ポリステロール線 (直径 2.9 mm, ポリステロール厚さ 0.02 mm) ④ ポリエチレン線 (0.85 mm 銅線 7 本より, ポリエチレン被覆外徑 6 mm)

ところで第4圖のような電界の分布を作るにはどうすればよいかという問題が起る。表面波は導線を中心とする圓對稱の電磁界であるから、送受端でも

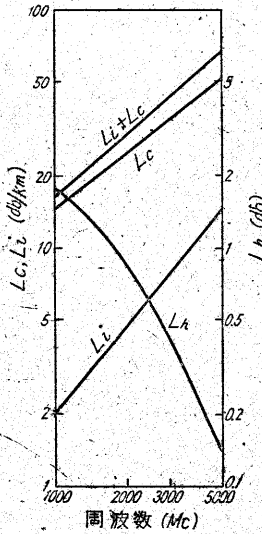
圓對稱の線路に接続するのが好都合である。マイクロ波に適する圓對稱の線路は同軸線路であるから、これを表面波線路に接続することを考えればよい。第6圖はその一例で、同軸線路の中心導體はそのまま表面波線路に接続し、外部導體は直径をゆるやかに大きくして、ラップの形にしてある。このようにすれば、同軸線路中の電磁界から表面波線路の電磁界に無理なく移り變つていくことができるのである。



第6圖 同軸線路を表面波線路に結合する方法

第6圖のような端局装置を使用しても、完全に無損失にすることはできないが、ラップの口径を十分大きくすれば、損失を十分小さくすることができる。その損失がどの程度の大きさになるかということは、受信側で考えてみればわかりやすい。第5圖で説明したように、導線の周囲の電磁界は導線からはなれるに従つて弱くなるが

受信側ではラップの口径と同じ距離のところまでにくまれるエネルギーがラップに吸収されて、有効に受信されるものと考えて大きい誤差はない。この部分のエネルギーの割合は第5圖から求めることができるから、これから端局装置の能率を計算することができる。送信側では可逆の理によつて、受信側と同じ能率であるとして差支えない。このようにして口径 33 cm のラップを送受端に付けたときの損失と周波数の関係をもとめた結果を第7圖に L_h として示してある。周波数が高くなれば波長が短くなるから、ラップの口径内にはいるエネルギーの割合が大きくなって、端局装置の損失が急激に減少していきこの曲線から



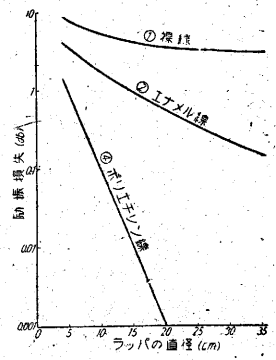
第7圖 表面波線路の勵振損失 (L_h) および線路の減衰 (L_i+L_c) の例。線路は直径 2 mm、被覆の厚さ 0.05 mm のエナメル線、ラップは口径 33 cm

わかる。第8圖はラップの直径と勵振損失との関係を 4200 Mc の場合について計算した値を示したもので、エナメル線ならば直径 35 cm、ポリエチレン線ならば直径 10 cm 以上になれば勵振損失は 0.1 dB 以下になるが、

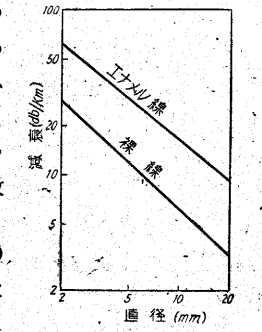
裸線ではよほど大きいラップを使用しないと勵振損失を 1 dB 以下にすることさえ困難であることがわかる。

線路の減衰 導線の導電率が有限であることとこれを囲む誘電體に損失があることとのために、線路の長さ按比例する減衰を生ずるわけであるが、直径 2 mm の銅線の表面に厚さ 0.05 mm のエナメルを塗つ

た導線は第5圖と同じもの(銅の抵抗による損失)および L_i (エナメルの誘電體損によるもの)のようになる。これによれば 4000 Mc に対する減衰は約 55 db km となつて、第2圖に示した導波管の減衰よりかなり大きい。しかし導線の直径を大きくすれば減衰をもつと小さくできるのであつて、4000 Mc の周波数における減衰と導線の直径との関係を計算した結果は第9圖のようになる。曲線(a)は裸銅線、(b)は厚さ 0.1 mm のエナメルで被覆した銅線の場合で、後者でも直径 6 mm 以上になれば第2圖の導波管より減衰が小さくなることわかる。裸線は減衰は小さいが、電磁界が遠方までひろがるために附近の物體の妨害を受け、また端局装置の損失が大きくなつて工合がわるいのである。



第8圖 ラップの大きさによる勵振損失の變化、計算した結果は第7圖の L_c 、導線は第5圖と同じもの(銅の抵抗による損失)および L_i (エナメルの誘電體損によるもの)のようになる。これによれば 4000 Mc に対する減衰は約 55 db km となつて、第2圖に示した導波管の減衰よりかなり大きい。しかし導線の直径を大きくすれば減衰をもつと小さくできるのであつて、4000 Mc の周波数における減衰と導線の直径との関係を計算した結果は第9圖のようになる。曲線(a)は裸銅線、(b)は厚さ 0.1 mm のエナメルで被覆した銅線の場合で、後者でも直径 6 mm 以上になれば第2圖の導波管より減衰が小さくなること



第9圖 裸線およびエナメル線(エナメルの厚さ 0.1 mm)の減衰と線径との関係(計算値)

4. 表面波線路に関する測定

手もとにある數種類の導線を表面波線路として使用しその兩端にいろいろの寸法および材料のラップを付けて勵振したときの線路の減衰および勵振損失を主として 4200 Mc の周波数で測定したので、その結果について略述することとしよう。

導線 裸線(直径 2.9 mm)、エナメル線(直径 2.9 mm の銅線に約 0.07 mm のエナメル被覆をしたもの)、ポリスチロール線(直径 2.9 mm の銅線に厚さ約 0.02 mm のポリスチロールを塗布したもの)、およびポリエチレン線(直径 0.85 mm の銅線を7本より合せたものにポリエチレンを被覆して外径を 6 mm としたもの)の 4 種類である。

勵振用ラップ A (トタン製、開口直径 33 cm、長さ

55 cm), B (銅板製, 開口直徑 22.5 cm, 長さ 32 cm), C (開口直徑 14.5 cm, 長さ 17 cm 銅板製に銀メッキをしたもの) の3種類である。

測定方法 クライストロン 2K54 で発生した約 4200 Mc の電力を導波管に加え, その端からループで同軸線路に結合し, 勵振用ラップを経て表面波線路に電力を供給する。線路の他端は同軸線路上の適当な點で短絡して定在波を發生させる。表面波線路の附近に鑢石檢波器をおき, 線路からの距離を變えて檢波器の出力を測定すれば, 線路の周圍の電界の分布を求めることができる。勵振端から見た Q (同調曲線のすどさを定める回路定數) を測定すれば(その方法は専門的になるから省略するが, 文献 (3) (4) を参照されたい), 勵振用ラップの損失 L_h と線路の損失 αl (α は單位長當りの減衰, l は線路の長さ) との和を求めることができるから, 長さ l を變えて測定を行えば, L_h および α を求めることができる。

線路の周圍の電界分布 各種の線路についてその周圍の電界の分布を測定した結果を第5圖に理論値と比較して示してある。裸線では電界がかなり遠方までひろがつているのに對し, エナメル線では距離の増大と共に急激に電界が減少し, ポリエチレン線では線路の周圍數 cm 以内の部分に集中していることがわかる。

線路の損失および勵振損失 4 種類の線路を 3 種類のラップといろいろに組合せて, 線路の長さを 4~24 m に變えて測定を行い, その結果から線路の減衰および勵振用ラップの損失 (送受を合算したもの) を求めた結果を第1表に示してある。實測値は理論値の 2~4 倍とな

第1表 線路の減衰および勵振損失の測定結果

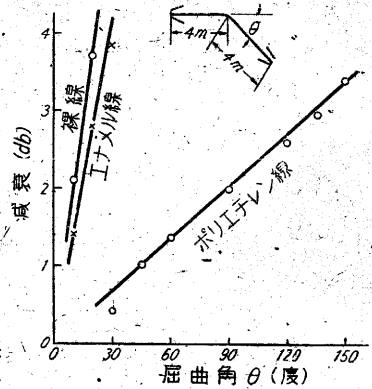
線路の種類	ラップの種類	線路の減衰 (db/m)		勵振損失 (db)	
		實測値	理論値	實測値	理論値
裸線	B	0.06	0.021	3.6	3.52
	C	0.04	0.021	3.9	4.30
エナメル線	A	0.16	0.044	1.7	0.2
	B	0.12	0.044	1.6	0.42
ポリスチロール線	C	0.13	0.044	3.3	0.98
	B	0.08	0.040	2.0	1.29
ポリエチレン線	B	0.19	0.11	0.2	0.001
	C	0.21	0.11	1.0	0.01

っているが, これは導波管などの減衰を測定しても見られることであつて, 導體の表面が理想的な状態になつていないため, あるいは誘電體の損失が假定した値よりも大きいためであらうと思われる。ポリエチレン線の勵振損失は理論値にくらべていちじるしく大きいが, これは

同軸線路の中心導體を支持する絶縁物の損失等がある大きさを有するためであらう。ラップAは特に構造上不完全な點が多かつたので, これを使用したときの勵振損失についても同様のことがいえる。

線路の屈曲および垂下による損失 第10圖は線路

をいろいろの角度で曲げたときに生ずる損失の増加を示したもので, 電界が遠方までひろがつている裸線やエナメル線では影響が大きく, 電界が集中しているポリエチレン線では影響が小さい。線路の垂下による損失の増加を示す第10圖についても同様のことがいえる。両方とも屈曲部は小さい半径で曲げてあるので損失の増加が大きい, 大きい半径で曲げれば損失をかなり小さくすることができる。



第10圖 線路の屈曲による損失の増加

以上の測定結果はすこぶる不満足なもので, 測定方法や測定器についても今後の改良にまつべき點が多い。またもつと低い周波數でも測定

を行つてみる必要がある。研究の進展にともなつて, 逐次發表していきたいと考えている。

第11圖 線路の垂下の影響

を行つてみる必要がある。研究の進展にともなつて, 逐次發表していきたいと考えている。

(1951・8・28 受)

文 状

- (1) G. Goutau: Surface wave transmission line. Radio Electronic Engineering Edition, Radio and Television News, May, 1950.
- (2) G. Goubau: Surface waves and their application to transmission Lines. J.A.P., Nov., 1950.
- (3) 星合・森脇・猪瀬: 表面波線路の諸特性, 第25回電氣三學會連合大會講演要旨 (III) p. 57, No. 10. 10.
- (4) 猪瀬: 表面波線路の特性, 東大生研電氣談話會報告, Vol. 2, No. 23, June, 15, 1951.