7. 衛星中継におけるノイズ

国際電信電話会社 宮 憲 一

本年7月10日に打上げられたテルスタ衛星を中継してテレビ、電話、データ、写真などの伝送試験が成功裡に行なわれた。その技術的の試験成績の詳細な発表はされていないが、信号対ノイズ比においても、質的にもほぼ満足すべき結果が得られたといわれている。周知のように近い将来、実用化の見込みの多い衛星中継方式は、1~10 Gc 帯における能動衛星方式であろうから、ここではその場合のノイズに限ってのべてみる。衛星通信も他の地上固定通信と本質的に異なるところはないわけであるが、技術的に見ていくつかの特異点がある。その1つは衛星の重量と容積に一定限度があるために、衛星から数ワット以上の電力を発射することは現状としては無理であり、そのために地上における受信電力が微弱になることであろう。したがって通信に必要な信号対ノイズ比を得るためには、信号レベルの増加をはかることも必要であるが、同時にノイズを通過することに特別な注意を払わねばならない。

衛星通信におけるノイズの問題は、地上での受信と衛星での受信の場合に分けられる。ところが衛星受信機の性能は地上受信機の性能にくらべノイズ温度が20 dB くらい高いが、地上送信電力を十分大きくして、衛星上での受信は地上での受信の場合にくらべ信号対ノイズ比で10 dB 以上高くするよう設計されている(第2表参照)。したがって全衛星中継通信系におけるノイズの問題は、

ほとんど地上受信の場合に限って論じてよいのである。以下、それらの主要の点について説明する。

1. ノイズの取扱い

地上受信系におけるノイズ源を大別すると、第1図のように、混信波を含め外部からアンテナ系に入り込む種々のノイズ源と、受信装置内部において発生するノイズ源とに分けられる。

ノイズの大きさは、すべて等価ノイズ温度で表わす。したがって多くのノイズ源が第1図のようにカスケードに入り込む場合の総合ノイズは、各ノイズの温度を実効的に累計したものとして得られる。総合等価ノイズ温度 T_T (°K) と総合ノイズ電力 P_N (ワット) との関係は

$$P_N = k T_T B \quad (1)$$

で表わされる。ただし k はボルツマンの定数 (1.38×10^{-23} joules/°K), B は帯域幅 (c/s) である。

いまアンテナ系のノイズ温度を T_a 、標準室温(給電線温度)を T_0 、等価ノイズ温度による受信機ノイズ温度を $T_e (= (NF-1)t_0)$ 、給電線損失を L_F (ただし $L_F > 1$) とすれば、 T_T はつぎのように示される¹⁾。

$$T_T = T_a + (L_F - 1) T_0 + L_F T_e \quad (2)$$

2. アンテナ・ノイズ

2.1 宇宙ノイズ

第2図は Hogg 氏の求めた結果²⁾であって、宇宙ノイズ、および中緯度地方の夏季の標準大気における大気ノイズの特性の計算例(実線)および測定例(×印)を示す。同図の左側に直線で示されたものは銀河ノイズであって、銀河の中心に向けられた“無限に狭いビーム幅をもつ理想アンテナで観測した場合の温度”(brightness temprature)の周波数特性である。銀河は時間的に移行するから実際のノイズ強度は時間的に変動し、これよりも小さい値をとる。図で明らかに周波数とともに宇宙ノイズは減

第1図 宇宙通信受信系におけるノイズ源

"Noise in Communication Satellite Relay Systems" by Kenichi Miya

第2図 夏の標準大気における酸素および水蒸気によるアンテナ温度と銀河ノイズ温度 (D. C. Hogg による)

少し、高い周波数帯では無視しうる程度となる。

2.2 大気ノイズ

大気中の酸素および水蒸気は高い周波数帯において顕著な吸収体となるが、同時にノイズ源として作用するものである。そのノイズ温度は天頂方向に対して最も小さく、アンテナ仰角が低くなると急速に増加する。大気中にある雨滴は吸収体として作用し、降雨時には最大 100°K にもおよぶノイズを発生する場合もあることが報告されている²⁾。

2.3 大地ノイズ

第1図の T_a の中に、アンテナの側方および後方輻射により入ってくる大地などからの輻射によるノイズがふくまれている。大地は一般に電波の吸収体であり、その吸収係数 $a(\theta)$ に従ってノイズを放射し、一方、反射係数 $r(\theta) = 1 - a(\theta)$ に従って大気および宇宙ノイズを反射する。したがってアンテナ端子における大地ノイズ T_a は、アンテナの立体指向性 $G(\Omega)$ と立体ノイズ温度分布 $T(\Omega)$ の関数として

$$T_a = \frac{1}{4\pi} \int_0^{4\pi} G(\Omega) \cdot T(\Omega) d\Omega \quad (3)$$

の形で表わされる。 $T(\Omega)$ は上空 ($0 < \theta < \pi$) に対しては第2図のように

$$T(\theta) = T_s(\theta) \quad (4)$$

であり、大地方向 ($-\pi < \theta < 0$) に対しては

$$T(\theta) = a(-\theta) T_0 + p(-\theta) T_s(-\theta) \quad (5)$$

で示される。この場合、大地の温度は T_0 と見なしている。理想化されたアンテナの指向性は第3図のように考えられる。いまアンテナが天頂を向いたときの基準の T_a について考えると、この T_a は $T_a = T_1 + T_2 + T_3$ なる3つの部分に分けられる。すなわち T_1 は G_0 なる主ビー

ムが拾う大気ノイズによるもの、 T_2 は G_b なる副輻射が直接に拾う大気ノイズによるもの、 T_3 は同じく副輻射が拾う(5)式の大地ノイズによる温度である。いま G_b を isotropic level にくらべ -10 dB として計算すると、 $T_1 = 2.5^\circ\text{K}$ 、 $T_2 = 0.7^\circ\text{K}$ 程度となる。また T_3 は大地の状態異なり完全反射大地で 0.7°K 、海面で 7.6°K 、普通の大地で 14.5°K の程度になる。もし G_b を -30 dB 程度に小さくすれば、 T_3 は T_1 にくらべ無視できるようになる。 G_b はアンテナの構造により異なるが、ホーン形アンテナは G_b が小さい点においてもすぐれている。

一般にアンテナ吹付けホーンを開口面から外に突き出さぬ構造がいわゆる Spillover を少なくし、 G_b を小とするための簡単かつ有効な手段である。しかしその場合、利得を最大にする条件とは両立しない。とにかく宇宙通信用アンテナにはノイズおよび後述の混信除去の点より副射の小さいことが要求される。

2.4 その他のノイズ

太陽から発生するノイズは、1 Gc において $250,000^\circ\text{K}$ 、5 Gc で $30,000^\circ\text{K}$ 程度の高いものである。確率は小さいが、アンテナが太陽を直接指向する場合には著しい妨害をおよぼすことになる。遠方の雷放電ノイズは、VHF 以下の低周波数帯で著しいものであるが、1~10 Gc 帯ではほとんど問題にする必要がない。人工ノイズの影響は周波数の低いほど蒙りやすいが、これを避けるため地上局施設は都市からは遠く離し、裸高压送電線および交通量の多い道路からは数 100 m 以上離すような考慮される。

3. 受信装置ノイズ

受信装置ノイズのうち、アンテナおよび給電系の損失 L_F によるノイズの増加の関係は(2)式に示すとおりであるから、一般的にいったアンテナの一次ホーンと受信機との距離を小さくしたりしてノイズの減少をはかることが大切である。代表的なアンテナについての基準のアンテナノイズ温度の概略値は第1表の程度である。

第3図 理想化されたビームアンテナの指向性

第1表 各種アンテナの基準のノイズ温度比較

アンテナの形	ノイズ温度 (°K)	備 考
普通のパラボラ形	50~70	同時ロービング
特殊のパラボラ形	18	
	25	同時ロービング
カセグレン形	5~10	
ニア・フィールドカセグレン形	3~5	
ホーン形	2~3	

受信機ノイズを減少させるために、地上局用受信機には主としてメーザあるいは冷却形のパラメトリック増幅器が使用される。一般に受信機ノイズ温度は周波数とともに徐々に増加する傾向をもつが、上記の周波数帯内における最良値は、TWT 増幅器で 400°K、パラメトリック増幅器で 150°K、同じく冷却形で 20°K、メーザで 10°K 以下と見られている。

米国における 1 つの実験例を示せば、全受信系の実効ノイズ温度は約 51°K であって、その内容は $\theta=7.5^\circ$ の大気ノイズ 19°K、メーザ 4°K、ホーン・アンテナ 2°K、TWT 3°K、コンバータ 0.3°K、導波管 0.5°K、レドームの効果 19°K となっている。英国においては直径 85 フィート、開口角 180° のパラボラ形アンテナに追尾用ビーム偏向装置を付し、メーザを用いた装置で、実効ノイズ温度で 100°K を高くこえないという結果を得ている³⁾。

4. 混 信

現在のところ、宇宙通信用の周波数はほとんど地上マイクロ波業務用周波数と共用する方針で検討が進められている。したがって共用できるためには宇宙通信地上局は相互に干渉をおよぼさぬよう、地上マイクロ波業務局と適当距離（ともに地上置局するとして 100~150 km）離さねばならない。その場合、地上局が山岳により囲まれ、回折損失を大にすることにより干渉電波をしゃ断するような地形に置かれることがとくに望ましい。参考のため、1962 年 4 月の CCIR 中間会議における技術基準から関連ある事項を示せばつぎのとおりである。

a) 人工衛星から発射されたまたは反射する 1~10 Gc の電波の地球表面での電力密度は -125 dBW/m^2 、また 4 kc 帯域で平均した場合は $-180 \text{ dBW/m}^2/\text{c/s}$ をこえてはならない。また地上マイクロ送信機の最大出力は 55 dBW をこえてはいけなない。

b) 干渉規格はつぎのように定めている。すなわち地上マイクロ回線から宇宙通信系に対する干渉レベルは、時間の 99.9% の間、受信機的全帯域幅でどの 1 c/s 幅をとっても受信機ノイズより 6 dB 以下とし、また宇宙通信系から地上マイクロ回線に対しても干渉レベルは同じ条件の下で受信機ノイズ以下とする。ただし FM 方式を使用する回線は負荷の状況によっては搬送波の近くに全エネルギーが集中して大きな干渉をおこすおそれがあるので、搬送波分散技術を採用すること、あるいは回線配列方式、偏波面の使用を考える方法などが提案されている。また別の規格として、時間率を考慮し、一通話あたりの干渉ノイズは評価 32 pW (SN 比 75 dB) 以下とする方法が示されている。

航空機がアンテナの主ビーム角度内に入ると、受信電

第 4 図 国際接続の参照回路

波に干渉を与えることが考えられ、そのほかに地上マイクロ局電波を反射して干渉を与えることがありうるので、地上局は航空路から外れた場所に設置するよう考慮される。

5. 衛星通信系

衛星通信を世界的に行なうにあたり、とくに低高度衛星方式が採用される場合には、1 回の衛星中継で行ないうる伝送距離にはおのずから限界がある。この点を考慮して能動衛星を用いる世界多重電話中継回路網と世界白黒テレビ中継回路網の参照回路が、同じく CCIR の中間会議でまとめられている。参照回路とは第 4 図のように 2 つの地上局と 1 つの能動衛星の 1 組を 2 つ連続接続して構成した回路である。多重電話中継の参照回路における零相対レベルの点の許容ノイズ電力は 1 時間の平均で 20,000 pW 以下、1 組では 10,000 pW 以下であり、また白黒テレビ中継では許容 SN 比は 99% の時間で 52 dB 以上とされている。ここに 1 つの参考例として ATT 会社が最初に発表した低高度衛星中継通信方式のパラメー

第 2 表 能動衛星中継方式におけるパラメータの例

項 目	規 格
衛星最大距離	4,600 マイル (7,360 km)
最大伝搬損失	130 dB
仰 角	7.5° 以上
アンテナ開口面積	1,700 ft ² (60 ft 直径)
受信機ノイズ	30°K
10 Mc/s 帯域ノイズ	-144 dBW
地上送信電力	1 kW
衛星アンテナ利得	-3 dB (Isotropic に対し)
衛星受信機ノイズ	3,000°K
100 Mc/s 帯域ノイズ	-114 dBW
衛星受信電力	1 W
方式目標に対するマージン	-1 dB
FMFB 閾値 ($C/N=12\text{dB}$) 上のマージン	2 dB
変 調	大きい FM
改 善 度	21 dB
ベ ース バンド	5 Mc/s
R-F スペクトル (30 dB ダウン)	104 Mc
無線周波数	6 kMc
テレビの ptp 信号対 rms ノイズの SN 比	48 dB
メッセージ回路のノイズ	38 dBa (零レベルにて)
メッセージ回路数	600

タ⁴⁾を第2表に示す。現在は第2表よりもさらに改善が加えられているが、衛星通信においてはノイズの問題はとくに重要であることが知られる。

通信方式の問題は本文の課題外であるので簡単にふれるが、衛星通信においては、もっぱら信号対ノイズ比の向上のために、変調指数を実効的に減ずるように局部発振器に負帰還をかける周波数変調方式 (FMFB) を用いて等価的に帯域幅を狭くして、方式利得と閾値の改善とを得るようにしている⁵⁾。このほかに閾値を低くとり得る PCM 方式も将来の問題として考慮されている。

6. む す び

以上、簡単であるが衛星中継におけるノイズの問題についてのべた。現状としては必要 SN 比を得るための

衛星通信系諸元に十分な余裕があるとはいえない。実用性を増すために衛星高度を高くすることになるが、ノイズの問題は施設と方式の改善に関連して衛星通信における今後の中心課題になってゆくものと思う。

〔参 考 文 献〕

- 1) 斎藤成文：低雑音増幅器の現状とその重要性，電学誌，12 (1960)，1849.
- 2) Hogg, D. C.: Problems in low noise reception of microwaves, IRE Trans., PGSET, Sep., 19-20-21 (1960), 8-2.
- 3) Communications via Satellites, Electronic Engng., June (1962), 384.
- 4) Pierce, J. R.: Frequency Needs for Space Communication, U. S. Docket, No. 11866.
- 5) B. S. T. J., July, No. 4 (1961)

(36頁より続く)

3.1 熱ノイズ

同軸ケーブル (2.6/9.4 mm) の減衰量は 6 Mc/s で 5.8 dB/km, ビデオペアケーブルの減衰量は 12.5 dB/km であり，最大中継間隔は回線の信号対ノイズ比で決定される。すなわちビデオペア方式では 5.5 km, 同軸ビデオ方式では 11.1 km, 同軸残留側帯波方式では 9 km (標準) となっている。

3.2 地電流による誘導ノイズ

回線の送端と受端の大地電位に交流電位差が存在する場合には，第 12 図に示すようにケーブルの軸方向に交流電流 (縦電流という) が流れ映像信号に重畳する。

ビデオペア方式はこれをさけるために，しゃへいされた平衡 2 線形のケーブル (125 Ω) を使用するもので，その平衡度を十分よくし，さらに安定化増幅器 (クランプ) を用いることによって誘導妨害を軽減している。

同軸ビデオ方式は第 13 図に示すように普通の不平衡同軸ケーブル (75 Ω) を使用し，両端に広帯域変成器を設け，ケーブル外部導体を地気から浮かすことによって縦電流を切断するものである。第 14 図に変成器による縦電流抑圧度を示す。また第 15 図に示すようにケーブルを鉄心に巻くことによって，縦電流に対してインピーダンスをもたせる方式 (英国) もある。残留側帯波方式では最低伝送周波数が約 500 kc であるため，地電流の影響は問題にならない。

3.3 パルス誘導ノイズ

同一ケーブル内に高いレベルの直流電信回線がある場合，そのパルス誘導は無視できないので，同軸ビデオ方式のさいは，片線地気の直流電信を収容することはさけねばならない。またテールケーブル端と局内機器を接続する局内ケーブルがパルス源に接近した場合には，パル

ス誘導を受ける危険があるので，2重しゃへいケーブルを使用する必要がある。

3.4 不要波漏洩によるビートノイズ

残留側帯波方式では第 16 図に示すように，映像信号 (0~4.3 Mc/s) は送端で 2 回の変調過程を経て 0.556~5.356 Mc/s に変換され，264 kc パイロットとともに伝送され，受端で 2 回の復調過程を経て，もとの映像信号に復調される。この間における諸種の不要結合波，シグナルリーク，キャリアリークなどの妨害が最小となるように周波数関係およびろ波器の特性などが考慮されねばならない。すなわち送信側ろ波器ではカラー伝送のときの 3.6 Mc/s 副搬送波のイメージが 15 Mc に復調されるのを防ぐため，第 17 図に示すように 16.8 Mc 付近に大きい減衰を与えており，受信ろ波器では 14.256 Mc/s, 15.312 Mc/s 成分が第 2 復調器で 13.2 Mc で復調した場合，1.056 Mc ならびに 2.112 Mc となって映像にビート妨害するのを防ぐため，第 18 図に示すように，14, 256, 15, 312 Mc/s 点に大きい減衰を与えている。

4. む す び

以上，主として白黒テレビジョン中継回線におけるノイズの問題を CCIR 規格と関連してのべたが，カラーテレビジョンについても CMTT において国際的な規格をまとめる方向に向かって動いており，CCIR 勧告としての決定を見るのもそう遠いことではないだろう。また近時，世界的な中継網の拡充にともない 2500 km 擬似回線長では現実には合わない場合もしばしばおきており，これをもっと長くしようとする動きがある。そうなれば，中継機に対するノイズ配分値はもっと苛酷なものとなり，テレビジョン回線としてもきわめて高品質な回線が要求されるようになると思われる。