航空機と地上局を結ぶテレビジョン ダウンリンクの特性

防衛庁第1研究所 東 条 秀 谷

航空機から発射されたテレビ電波の地上における受信実験について、防衛庁技研において得られた最近の成果をまとめたものである。

1. ま え が き

航行中の航空機における乗員の挙動、窓外の状況などについて遠方監視を行なうためには、通常、無線によるテレビ伝送を行なわなければならないが、航空機のもつ種々の制約と用途の特殊性のために、これを実施し、実用化した前例¹⁾はあまり数多くはないようである。

それゆえか、現在でも移動中の航空機については視覚情報を自由に得ることができず、情報交換はもっぱら音声に依存しており、また空からの情報収集においても、通信距離が長い場合は、実時間で画像伝送は必ずしも容易であるとはいえない。

防衛庁技研では、無人航空機の遠隔操縦を目標にして、昭和35年頃からテレビ無線伝送の実験を繰り返してきたが、周波数 607 MHz におけるヘリカルアンテナと定格出力 5 W の送信機の組合せでは、画像の伝送距離は 40 km を越えることがなかった。その後、UHF 放送の開始のために、割当周波数が 1380 MHz に変更され、また、昭和39年の宇宙中継の実現などにも刺激されて、器材を一新し、受信側に高利得のパラボラアンテナを導入した。その結果、郊外においては、少なくとも送受信間の電波視線をさえぎるものがない限り、自由空間伝搬路に等しい値にまで伝送距離が延びる場合がしばしば経験されるようになった²⁾。

ここでは昭和42年から43年にかけて行なった前後3回の実験について概略を述べ、若干の検討を加えてみた。

2. 実験方法および器材の性能

実験の方法は、航空機にテレビカメラ、送信機、電源

図1 高周波受信信号レベル測定法

電池、送信アンテナなどを搭載し、飛行中に機内で撮影した映像を送信して、これを地上側で受信し、ビデオテープに録画する。受信側は移動局であるので、器材はすべて分解可能な可搬形のものになっている。録画と同時に受信信号レベルの計測も可能なかぎり行なった。その方法は図1に示すように、標準信号発生器 SG で受信機 Rx のレベルメーター LM と、受信機のリミッター段の出力を記録するペンレコーダー PEN を校正する。受信機 Rx の高周波段利得は固定できるので、実験後これらの記録から、校正曲線を照合して受信信号レベルを知ることができる。昭和43年の2月、7月、12月にそれぞれ異なる場所で伝搬試験を行なったが、実験器材にはいずれもまったく同じものを使用した。器材の主要諸元を列記すると、

図2 送信アンテナ概形

図3 送信アンテナ指向性

"Performance of the Television Down Link from an Aircraft to the Ground Station" by Hideya Tōjō (Research and Development Center of Defense Agency, the 1st Lab., Tachikawa, Tokyo)

図 4 受信アンテナ概形

図 5 受信アンテナ指向性

(1) 送信アンテナ 図2のような概形をもつ1/4波長ホイップと3段コリニヤアンテナで、後者の指向性は図3のようになり、この対ダイポール利得は約4dBとなる。送信アンテナの機体への取付位置は、給電線なるべく短くするために、おおむね機体の胴体下側の中央附近とした。

(2) 受信アンテナの概形と指向性 それぞれ図4、図5に示すようになる。この受信アンテナは左旋円偏波用パラボラアンテナであって、図5の指向性から、 E, H 該当面の半値幅はいずれも 5.3° となり、絶対利得 G は実験式、

$$G = 20 \log \frac{332}{\theta_H + \theta_E}$$

から、 $G \approx 30$ dB と考えられる。定在波比は実測値で約1.4であった。このパラボラアンテナは3分割構造の総アルミ製のもので、重量は約78 kgであり、無風状態ならば片手で操作できる。

(3) 送信機 搬送周波数 1380 MHz, FM 変調で周波数偏位は ± 2 MHz, 定格変調時の高周波送信電力は2.5 W, 直流供給電源は $28 \text{ V} \times 10 \text{ A}$ で、高周波への電力変換効率は約1%となる。

(4) 受信機 中心周波数 1380 MHz, 中間周波帯域

図 6 無線回線も含めた総合ビデオ通過特性

図 7 ビデオ通過特性測定系

幅 20 MHz, 雑音指数は実測値で 10 dB, 送信機の変調入力端子から受信機出力端子までの総合のビデオ通過帯域特性は図6のようになる。このときの測定系は図7に示すようなものであり、掃引発振器 SWG から送信機 Tx へビデオ信号を加え、擬似負荷 DM を負荷したリアクタンスアッテネーター X-ATT から分岐して、高周波信号を受信機 Rx に加える。Rx の出力をシンクロスコープ SCOPE に加えて観測したものである。

(5) テレビカメラ 白黒用の1インチビジコンを用いた標準方式のもので、走査線は525本、像数は30枚/secでランダムインターレースである。通常光用と赤外線用のビジコンを装着したものを、各1台ずつ用いた。使用レンズは $f: 75 \text{ mm}$, ズーム比 1:4 である。

3. 実験結果について

画像伝送距離の最大値は実験を行なった場所と、そのときの送信機の調子などにより異なり、昭和43年2月の入間において約 150 km, 同年7月の立川において約 30 km, 同年12月の岐阜において約 200 km であった。順不同にはなるが、まず立川における結果から検討する。

3.1 立川-市が谷での実験結果

デモンストレーションを目的として、43年の7月に立川の第3研究所構内の3階建のビルの屋上(地上12m)にパラボラアンテナを設置し、小形ヘリコプター H-19 に送信機を搭載して、市が谷、朝霞方面へ飛行をして実験を行なった。送信アンテナは1/4波長ホイップとした。飛行コースとそのプロフィールを図8、図9にそれぞれ示す。当時の録画を再生した例を写真1に示す。この写真でテレビ画像に付してある番号は図8の飛行コース中の同番号の位置に送信点があるとき撮像したものであ

図 8 立川-市が谷間の飛行コース

図 9 立川-市が谷プロフィール

(c) 東武線，成増の北，久寿川との立体交差点，距離 19 km ③

(d) 府中競馬場，距離 7 km ④

(a) 川越街道，東池袋付近，距離 26 km ①

(e) 多摩川関戸橋の上を走るトラック，距離 6 km ⑤

(b) 荒川にかかる東北本線鉄橋，距離 27 km ②

写真 1 立川-市が谷の受信画像

ることを示している。このときは送信機の調子がやや不調で，送信電力が 2 W 程度であったが，高度約 1,000 ft で飛行した場合，伝送距離の限界は荒川附近までであった。この実験では人員不足のため，受信信号レベルの測定を行なわなかったが，他の実験の経験と録画画像の画質から推定して，信号レベルは図 10 の斜線部分のようになると思われる。同図で①は自由空間値，②，③はそれぞれ送信点の高度が 300 m，1,000 m であるときの，

図 10 立川-市が谷の受信信号レベル推定値

図 11 自由空間伝搬損失

球面大地回折波による予想入力信号レベルである³⁾。参照のため、1380 MHz における自由空間伝搬損失を図 11 に示す。

図 10 の記号 A, B, C, D は画質評価の段階を示しており、A は 5 段階画質評価法の 4 以上、B, C, D はそれぞれ画質 3, 2, 1 に対応している。図 10 でみると、30 km 地点における受信信号レベルは自由空間値より約 17 dB ほど低くなっている。図 14, 図 18 に示す郊外の実験結果では、30 km 地点で自由空間損失に対する付加伝搬損失は約 8~10 dB 位であるから、立川-市が谷間の例では約 7~9 dB の付加伝搬損失がさらに余分に加わっていることになる。見通し距離内であれば大地による回折損失は小さいはずであるから、この余分の付加伝搬損失は郊外地と市街地という、地上における構造物の密度の差によるものであろう⁴⁾。

3.2 入間-白河における実験結果

器材の輸送などの都合から、埼玉県入間飛行場を選び、43 年の 2 月にセスナ形の小型実験機を用いて伝搬試験を行なった。飛行コースとプロフィールを図 12, 図 13 にそれぞれ示す。

図 12 入間-白河の飛行コース

図 13 入間-白河プロフィール

写真 2 入間-白河間の実験において、入間飛行場エプロンにおける受信状況

受信側では写真 2 に示すように、受信機材を車輦に積載して、滑走路わきのエプロンに駐車して手動追尾を行なった。プロフィールに示すように、入間-白河の間は見通しをさえぎるものがまったくなく、しかも白河方面へ向

(a) 栗橋上空, 距離 40 km ㉗, 実験機の操縦席

(c) 石橋上空, 距離 80 km ㉙

(b) 小山上空, 距離 60 km ㉘

(d) 宇都宮の陸上競技場, 距離 90 km ㉚

写真 3 入間-白河の受信画像

かってゆるやかな昇り坂であるために、航空機は自然に高度を上げる形になる。飛行場付近は平坦な田畑で、視野をさえぎる家屋、樹木などもまばらである。このときの受信画像は写真3のようになる。距離 80 km を越えるとフェーディングがところどころで目立つようになるが、それが回復すると画質3ぐらいの画像が受信される。図14は受信信号レベルの記録である。ペンレコーダーの動作不良のためレベルメーターから読取った値を記した。この記録の特徴としては、100 km 附近で受信信号レベルが自由空間値に接近していることである。

図 14 入間-白河の受信信号レベル平均値

(e) 白河上空, 山岳地帯に入り、積雪が見られる, 距離 150 km ㉛

この原因は受信機チューナーの感度の非直線性によるという意見もあるが、それ以外に 100 km 以遠では電波視線が地表に接近してくるため、直接波よりも地表に近い伝搬コースを通る大地反射波が、地表面の突起物により先に減衰させられる結果ではないかと考えることもできる。

3.3 各務原-新宮における実験結果

画像伝送距離の限界を確認するために、43 年の 12 月に、岐阜県各務原飛行場において C-46 形輸送機を使用し、新宮方面への伝搬試験を行なった。飛行コースとそ

のプロフィールを図 15、図 16 にそれぞれ示す。飛行場のエプロンから南方の新宮方面へは地理的な見通しが開けているが、その見通し線の両側の、東南、西南方向には 2 km 位の距離に高さ 150 m 位の小山があり、また、新宮方面をみた視線が大地に接する付近には家屋の群が散在している。したがって、入間-白河の場合にくらべて、やや地理的条件は悪くなるといえる。送信アンテナは 3 段コリニヤアンテナを用いた。この場合の無線周波数におけるレベルダイアグラムは図 17 のようになる。

受信側の -74 dBm という値は、使用した受信機において、画質 4 の画像が得られる下限の信号入力レベルである。図 18 は時々刻々の送信位置の前後 800 m の区間について、記録された信号レベルの平均値を電子計算機によって求め、その結果を連続的にプロットしたもので

図 15 各務原-新宮の飛行コース

図 16 各務原-新宮プロフィール

ある。ところどころに短い垂線が下方へぶら下るように引いてあるのは、受信レベルの最大落ち込み幅を示す。

同図から 80 km, 120 km, 150 km 付近で深いフェーディングが起きていることが認められる。図 16 のプロフィールで、点線で放射状に示した曲線群は、電波の直接波と大地による 1 回反射波の路程差が波長の整数倍になる軌跡を示しており、航空機がこの軌跡を横切るとき干渉性のフェーディングが生ずると考えられる。図 18 において直線①は自由空間値であるが、②、③は送信点の位置がそれぞれ 3,000 m, 4,000 m のときの球面大地回折波による予想入力信号レベルである。この予想値は、自由空間値に対する付加損失を Γ_A とすると、自由空間電界強度を E_0 、観測電界強度を E として、

$$\Gamma_A = \left| \frac{E}{E_0} \right| = 8 \cdot 2^{1/4} \cdot (K \cdot a)^{5/4} \cdot \frac{(h_1 h_2)^{3/8}}{\sqrt{\lambda} \cdot d^3}$$

から得られる³⁾。ここに、 K : 等価地球半径係数、 a : 地球半径、 λ : 波長、 d : 送受信間距離、 h_1, h_2 : 送受信点の高さ、である。

すなわち、自由空間値に Γ_A を付加損失として加えれば、回折波による予想受信レベルが得られる。1380 MHz においては、

図 17 送受信間レベルダイアグラム

図 18 各務原-新宮の受信信号レベル平均値

図 19 信号レベルの累積度数分布図

$$\Gamma_A = 9.37 \cdot 10^9 \cdot \frac{(h_1 h_2)^{9/8}}{d^3}$$

となる。また、図中の記号 A, B, C, D は画質評価に関するもので、すでに説明したとおり、A は画質 4 以上、B, C, D はそれぞれ画質 3, 2, 1 に対応するが、A, B, C の下限はそれぞれ -74 dBm, -79 dBm, -83 dBm 位である。この図 18 によれば、ダイバシチーなどによってフェーディングを防げれば、約 150 km まで画質 4 で、また約 200 km まで画質 3 でそれぞれ受信できることがわかる。

図 19 は受信信号レベルの累積度数分布図であり、送信位置の前後 10 km の区間の記録を集計したものである。受信信号レベルの分布は、送信点が 40 km~70 km の位置にあるときはほぼ標準偏差 2 dB の正規分布をなしている。図中の点線①は参考用で、標準偏差 2 dB の正規分布の累積度数分布曲線を示している。また距離が 130 km 付近より遠い場合はレーレー分布に近づき、200 km 地点で航空機が旋回しているときの受信電界分布はレーレー分布よりも曲り方が激しい。図中②の点線は中央値が測定値の中央値に一致するようなレーレー分布の累積度数分布曲線を示している。このように累積度数分布が左のほうへ尾を引くのは、距離が遠いほど受信電界のフェーディングデプスが大人となることを示す。

図 20 は 118~150 km 区間の受信信号レベルの時間変動をフーリエ分解したもので、基本周期 $T=320$ sec である。同図によれば、周期 T が 320~30 sec 程度の比較的長い周期の変動が優勢で、周期が 10 sec 位より短い振動成分は小さく、また一様な振幅で分布していることがわかる。つまり、航空機を通信の相手とする場合、周期の長い成分が SN 比に対する大きな脅威となることがわかる。

以上は送信アンテナとして、3 段コリニャアンテナを使用した場合であるが、移動局間の通信には偏波性・干渉性フェーディングを軽減するため円偏波の利用が有効

図 20 受信信号レベル変動の周波数スペクトラム

(a) 名古屋市内、中村付近の競輪場、距離約 23 km ⑮

(b) 津市付近の海岸線、距離 80 km ⑯

写真 4 各務原-新宮の受信画像

であるといわれている⁷⁾ので、持ち合わせの 4 方向ヘリカル送信アンテナで実験したところ、受信レベルが低下し、良好な結果が得られなかった。

3.4 赤外ビジコンの撮像例

霞やもやが地表を覆って視界が不良の場合、赤外領域を通過させる光学フィルターと赤外線用のビジコンを併用すると視界がある程度改善される。しかし、被写体が移動する場合は残像が大きいので、たとえば図 21 に示すような分光感度特性をもつ N 177 を使用した場合、写真 5 に示すように画像が著しくにじむ。したがって、

図 21 N 177 の分光感度特性

写真 5 赤外線ビジコン N 177 による撮像例 (公園の団地)

航空機からの観測に用いるにはまだ改善の余地が大きいといえる。

4. 復調後の SN 比について

一般に FM 受信機の出力における SN 比は、

$$(S/N)_{dB} = 10 \log \frac{P_r}{NF \cdot kTB} + 10 \log \frac{3 \Delta F^2 B}{2 F_a^3}$$

ここに、 P_r =受信機高周波入力電力、 B =等価雑音帯域幅、 NF =雑音指数、 k =ボルツマン定数： $1.37 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ 、 T =アンテナの等価雑音温度 ($^{\circ}\text{K}$)、 ΔF =周波数偏位、 F_a =ビデオ回路のカットオフ周波数

となる⁵⁾。使用した受信機については、信号発生器法⁶⁾で測定した雑音指数 NF が約 10 dB、等価雑音帯域幅 B が 20 MHz、したがって、スレシホールドレベルは約 -83 dBm である。上式の右辺第 2 項は SN 比改善係数であり、受信側でデエンファシスをかけると $F_a = 3 \text{ MHz}$ となり、また、 $\Delta F = 2 \text{ MHz}$ 、 $B = 20 \text{ MHz}$ であるから、改善係数は約 6.5 dB になる。ここでは SN 比の概算のためビデオ信号 (同期信号も含めて) を尖頭値が等しい正弦波でおきかえて計算している。また、 $NF \cdot kTB = -92 \text{ dBm}$ となり、画質 4 の下限のレベルにおいては、入力信号レベルが -74 dBm であるから、 $S/N \approx 25 \text{ dB}$ となる。

実際のビデオ信号をシンクロスコープで観測して SN

比を求めると約 27 dB 位になっている。同様に、画質 3, 2 の下限レベルでの SN 比はそれぞれ 22~20 dB, 18~16 dB と推定される。

5. む す び

これまでのテレビ電波の伝搬実験で共通にみられることは、プロフィールにおいて送受信間の見通し線が、受信点における水平電波視線と角度にして $0.5^{\circ} \sim 0.6^{\circ}$ 以下に接近した場合、自由空間損失に加わる付加伝搬損失が急に増加し始めるということである。

すなわち、送受信点を結ぶ電波視線と、水平電波視線とのなす角が $0.5^{\circ} \sim 0.6^{\circ}$ 以上あれば、伝搬路を自由空間伝搬路とみなしても計算値と実験値の間に大差を生じない。しかしまた、これら両視線の角度が $1.5^{\circ} \sim 10^{\circ}$ くらいに大きくなる場合は、おそらく大地反射波との干渉による損失のためと思われるが、自由空間値よりも約 10 dB 程度、常に低い受信レベルが観測される傾向がある。

つまり、距離が近すぎる場合、受信レベルは自由空間値よりかなり下回る。

また、上述のように、遠距離において、視線角度の余裕が問題になるのは、周波数 1380 MHz では距離 100 km 付近において、1 dB のレベル変動は約 10 km の距離の変化となって現われるので、大地による回折損失の数 dB の増加でも伝送可能距離に大きく影響するためである。

さらに、音速機の時代にふさわしく、伝送距離を飛躍的に延ばすためには何らかの画期的な方法、たとえば機上用の走査アンテナを開発して衛星を利用できるようにするなどの手段が考えられなければならない。

実験は防衛庁第 3 研究所機体第 6 研究室、機器第 2, 第 4, 第 5 の各研究室、岐阜試験場、航空自衛隊実験航空隊の協力により実施された。また、技術的指導を芝電気 KK, 八木アンテナ KK, 浜松テレビ KK, 池藤無線工業 KK の技術者各位からいただきました。なお、立川-市が谷間、岐阜-新宮間の録画は、機体第 6 研究室の田中英策氏の編集されたものを撮影させていただきました。ご協力いただいた各位に感謝します。

(昭和 44 年 4 月 28 日受付, 昭和 45 年 3 月 3 日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 吉田, 沢辺: ヘリコプターによるテレビ中継装置, NHK 技研月報, 6 (1968)
- 東条: 航空機から自動車局へのテレビリンク動作特性, 信学会, 宇宙航行エレクトロニクス研資, SANE 69-14 (1969-10)
- 村上: 超短波 (下), 日本放送出版協会 (1955)
- 木名瀬, 菅: VHF, UHF 放送波の大都市内伝搬特性, 信学会アンテナ伝搬研資 (1967. 1)
- 渋谷: マイクロウエーブ伝搬解説, コロナ社, p. 301
- 山本: 高周波測定, コロナ社, p. 235
- H. Reed: Ultra high frequency propagation (1953) 221-225