計算機を利用した飛行機フラッターの推定

NHK 総合技術研究所 伊 藤 士 郎

飛行機による散乱波が希望波と干渉することによっておきる電界変動, すなわち, 飛行機のフラッターをデジタル計算機を用いて推定する計算プログラムについて説明し, 計算例を示し, また, 実測値との比較を行った. 実験結果と文献に与えられている結果とから, 飛行機の側方散乱断面に比例するパラメーターとして, 飛行機の全長×全幅を採ることを提案している. ジャンボジェット機の場合は約 500 m² の断面積を持つと推定される.

1. ま え が き

飛行機が近くを通過するとき, 受信しているテレビの画面が乱れることがある. この現象を飛行機フラッターと呼んでおり, 正規の到来電波と飛行機に散乱されて受信点に達する電波との干渉により受信電界が変動するためにおきるものである.

近年, 航空需要の増大に対処するために, 便数の増加と航空機の大型化が進められており, 飛行場周辺等でおきるこの種の障害は被害の程度, 範囲, 頻度において今後ますます増大するものと予想される. 新空港が建設されとか, 空港周辺あるいは飛行コース近くに住宅地が開発される場合を含め, 受信サービス上, 飛行機フラッターを推定することがしばしば必要になってくる.

上記の要求に応えるために, デジタル計算機を用いて飛行機フラッターによる電界変動を推定する計算プログラムを新たに作成し, これについて, 実測結果と比較などの検討を行った. なお, 電界強度計算サブルーチンは以前に開発したもの¹⁾を一部利用した.

2. 基 本 計 算 式

受信点での電界強度は, 正規到来波と飛行機による散乱波の合成として表わされるので, その実効受信電界強度は次式で計算される. すなわち,

$$E_r = E_0 * (F_1 * ADLS + RLS * F_2 * F_3 * K) \quad (1)$$

ただし,

E_0 : 自由空間電界強度

RLS : 飛行機による散乱損

$F_{1,2,3}$: 各端点間の基本伝搬損失, 1-送・受信点間, 2-飛行機・送信点間, 3-飛行機・受信点間

$ADLS$: 送・受信点間の付加損失

K : 受信空中線の指向性に関する補正量

である. 各項目について以下に説明する.

(1) 自由空間電界強度

$$E_0 = 7\sqrt{W}/d \quad (\text{V/m}) \quad (2)$$

ただし,

W : 実効放射電力 (W)

d : 送・受信点間距離 (m)

(2) 飛行機による散乱損

後述するように, 計算機入力データとしては, 飛行機の側方散乱断面 σ を与えるが, 飛行機位置での電界強度 E , 受信点での散乱波の電界強度 E' , 散乱損 RLS とすると, 散乱断面の定義に従って,

$$\sigma = 4\pi r_2^2 \left| \frac{E'}{E} \right|^2 = 4\pi r_2^2 \left| \frac{7\sqrt{W} \cdot RLS}{r_1 + r_2} \frac{7\sqrt{W}}{r_1} \right|^2$$

したがって, 散乱損 RLS は散乱断面 σ を用いて, 次式によって計算される. すなわち,

$$RLS = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \sqrt{\frac{\sigma}{4\pi}} \quad (3)$$

ただし,

$r_{1,2}$: 送信点・飛行機間および飛行機・受信点間距離

(3) 端点間基本伝搬損失

端点間が充分見通しであれば, 見通し内反射公式により, 次式で計算する.

$$F = |1 + R \exp(-jk\Delta r)| \quad (4)$$

ただし,

R : 大地反射係数

k : 伝搬定数 $= 2\pi/\lambda$, λ : 波長

"Computer Estimation of TV Signal Fluttering Caused by Aircrafts" by Shiro Ito (NHK Technical Research Laboratories, Tokyo)

図1 飛行機フラッターの計算手順
Flow chart for calculation of aircraft fluttering.

Δr : 直接波と大地反射波の路長差

見通し近傍または見通し外るとき、球面回折公式²⁾で、

$$F = 2\sqrt{2\pi x} \left| \sum_{n=1}^{\infty} \exp(-j\tau_n x) \cdot f_n(h_1) \cdot f_n(h_2) \right| \quad (5)$$

ただし、

$f_n(h_{1,2})$: 高さ利得関数, $h_{1,2}$ =端点の高さ

$x: \left(\frac{2\pi}{\lambda a^2}\right)^{1/3} \cdot d$, d -端点間距離, a -地球等価半径

τ_n : モード数

球面大地とみなせない伝搬路, たとえば端点間に山が存在するときには, 別途, 山越伝搬公式により F の値を計算し, 入力データとして与える。

(4) 送・受信点間の付加損失

受信点近傍の地形地物のクラッター効果³⁾により減衰を受けるが, この種の減衰を $ADLS$ とする。

(5) 受信空中線の指向性

受信空中線の向きは, 一般に飛行機の方角とは一致しない。したがって, 妨害波に対する受信空中線の水平・垂直指向性の補正を要する。

3. 計算の手順および計算プログラムの構成

計算手順の概略を示すフローチャートを図1に掲げた。所要入力データが与えられると, 送・受信点間の伝

図2 飛行機フラッター計算プログラムの構成

Schematic diagram of computer program for calculation of aircraft fluttering.

搬損失が計算され¹⁾, これに受信点近傍の地形地物のクラッターによる損失を付加して正規到来波の電界が求まる。

一方, 指定時刻の飛行機-送・受信点区間の伝搬損失が同様にして求まり, 飛行機による散乱損を加えて, 飛行機を経由する妨害波強度が算出される。妨害波に対する受信空中線の指向性を考慮して, 実効的な妨害波強度を求め, 正規波との合成を行って最終的な受信強度を計算する。

時刻設定を必要回数だけくり返して計算すれば時々刻々の受信電界強度が求まり, 作図プログラムにより, 電界変動波形としてプロッター上に画かれる。

計算プログラムの構成の概要は図2に示したとおりである。使用言語は FORTRAN IV, 計算機所要メモリーは約 100 k バイトである。

所要入力データは概略次のとおり。

(1) 送・受信諸元

周波数, 実効放射電力, 送・受信空中線高, 受信空中線の水平・垂直指向特性など。

(2) 飛行機関係諸元

飛行機の側方散乱断面積, 飛行高度, 上昇・下降角を含む飛行コース, それの送・受信点との位置関係, 飛行速度など。

(3) 作図関係

図の寸法, 尺度などを決めるデータ。

(4) 補助データ

計算時刻, 計算間隔などの設定データ, 伝搬付加損失, 大地反射波の有無を示す指標など。

4. 計算例および実測値との比較

4.1 計算例

飛行コースとして図3に示す場合について計算を行った。飛行コース (I) は電波に対して平行で高度 350 m の水平飛行, 飛行コース (II) は電波に対して 45° の角

図3 飛行コースと受信点の配置

Flight courses and receiving sites.

図 4 受信空中線指向性の例
Directivity patterns of receiving antennas.

図 5(a) 飛行方向が電波到来方向に平行な場合の計算例
Example of calculation for flight on the course (I).

図 5(b) 飛行方向が電波到来方向と 45° の角度をなすときの計算例
Example of calculation for flight on the course (II).

度をもつ高度 50 m の水平飛行で、速度はいずれも 140 mile/hr (252 km/hr) である。

計算は、飛行コース(I)と受信点A、飛行コース(II)と受信点Bの組合せで、送信点とA点間距離は 28 km、送信条件は東京タワーの TV ch-1 の諸元(周波数:

91.25 MHz, 送信空中線高: 340 m, 実効放射電力: 250 kW)を用い、受信条件は広帯域 8 素子八木空中線を地上高 8 m で使用した場合を想定している。また、飛行機のレーダー断面積として 100 m^2 を用いている。なお、想定した受信空中線の指向性を図 4(a), (b) に示した。

図 5(a) は飛行コース (I) の計算例である。送・受信点間、送信点・飛行機間、飛行機・受信点間のそれぞれの区間に大地反射波の存在が考えられるが、この場合、送信空中線と飛行機の位置が 340 m, 350 m と、ともに高いので、この間の大地反射波を無視してある。

図 5(b) は飛行コース (II) の計算例である。飛行高度が 50 m なので、送信点・飛行機間の大地反射波も考慮することが必要であり、すべての大地反射波を考慮してある。

図 5 では基準時刻として飛行機が受信点に最も接近する地点から 1 km 後方にある時刻を選んである。速度は 140 mile/hr だから、14.3 sec 後に飛行機が受信点に最も接近することになる。計算時間々隔は 25 ms

すなわち、40 Hz までの速い変動に追従できるが、計算結果による電界変動はそれ以上の速い変動を含んでいることがわかる。

4.2 実測結果の例

NHK 営業総局が行った TV ch-1 による受信実験⁴⁾

(a) 放送波に対して平行に移動した場合 [コース(I), 受信点A, 高度350m]

(b) 放送波に対して45°方向に移動した場合 [コース(II), 受信点B, 高度50m]

図6 電界変動記録波形の例

Typical experimental records of field strength fluctuation due to aircraft fluttering.

による測定結果の中から、図3に示した飛行コースに相当する記録をとりあげ図6に示した。図6(a)は飛行コース(I)の場合について受信点Aで記録したもので、図6(b)は飛行コース(II)に対して受信点Bで記録したものである。4.1節の計算はこの実験条件を考慮しており、使用した受信空中線は8素子広帯域八木空中線であることや、そのほかの条件も、実測値と計算値を直接対照できるようにしてある。使用記録計の追従周波数はせいぜい5 Hzが限度であり、計算例に現われているような速い変動にはとうてい追従していないはずである。

なお、実験の対象とした飛行機々種はC-46D型輸送機で、全幅32.9 m、全長23.3 m、主翼面積127 m²である。飛行速度は140 mile/hrの定速で、図3の飛行コース中、実線で画かれた部分だけが水平飛行を保障されている。

4.3 計算値と実測値の比較

図5(a)と図6(a)、図5(b)と図6(b)を比較するとことになる。計算値のほうは計算期間全部にわたって水平飛行を仮定しているが、実際には、図3に示す実線区間しか水平飛行は保障されておらず、したがって、飛行機が受信点に最も接近するときの前後10 sec程度が水平飛行であることになる。この区間以外は計算値と実測値の比較の対象にならない。たとえば、図6(a)の波形から判断すると、飛行機が受信点の頭上に来てから10 sec後あたりから上昇を始め、約30 sec後に旋回したものとみられるが、上昇を始めてから以後は、図6との比較の対象とはならない。

図5(a)と図6(a)をくらべるとき、図5(a)で、

20 sec 付近までの電界変動は記録計の周波数特性の不充分さによって、記録上に現われにくいことを考え合せると、計算と実測で飛行機最接近時に多少のずれがあるが、図5(a)は図6(a)の電界変動をよく説明できることになる。図5(a)では送信点・飛行機間大地反射波を無視したわけだが、これを考慮すると、変動幅は半分以下(デシベルスケール)になり実際を表わさないこともわかった。

図6(b)では、電界変動幅の最大値は約14 dBであり、対応する計算値(図5(b))も14 dBを示しており、よく一致している。図を示すことはしないが、送信点・飛行機間の大地反射波を無視すると、変動幅最大値は約8 dBと計算され、実際と一致しない。この場合には、予想どおり大地反射波を無視できないことを表わしている。図5(b)で中央部を除いては、記録計の周波数特性から、記録振

幅が減少することを考慮すれば、計算値が実際をよく表わしていることがわかる。

なお、実測値と計算値の比較の際、電界変動幅だけではなく電界強度そのものも問題にすべきである。飛行機の散乱波の影響を受けない状態での電界強度、すなわち正規到来波の電界は、実測値と計算値とも約70 dB(0 dB = 1 μV/m)であり、一致している。

5. 飛行機フラッターに影響をおよぼす要因

5.1 飛行機のレーダー断面積

入射電波に対する散乱波の相対強度を表わすパラメータとしてレーダー断面積があり、この計算プログラムでも、飛行機のレーダー断面積をあらかじめ入力データとして与えることにしてある。飛行機フラッターに関して必要なのは、任意の方向から電波が入射したとき、任意の方向に散乱される成分、いわゆる側方散乱断面積(bistatic cross section)である。しかし、飛行機に関しては、利用できるこの種のデータはほとんどなく、後方散乱断面積(monostatic cross section)の値が幾つか求められているにすぎない⁵⁾⁶⁾。

たとえば、旅客機B-727のレーダー断面積(monostatic)のVHF帯での実測値として、100 m²(noseおよびtail)、300 m²(broad)が平均値として報告されている⁶⁾。ここで飛行機から送信点方向への単位ベクトルを $\hat{T}$ とし、飛行機から受信点への単位ベクトルを $\hat{R}$ とするとき、このときの側方散乱断面積は、 $\hat{T} + \hat{R} = 0$ の場合(前方散乱)を除き、 $\hat{T} + \hat{R}$ で表わされる方位での後方散乱断面積にほぼ等しいことを実験的に確かめたとす

る報告⁷⁾の考えをとり入れると、上記の B-727 の飛行機フラッターに係わる断面積は 100~300 m²、中間をとって 200 m² が妥当な値であろうと推定される。

前述の計算値と実測値の比較から明らかになったように、輸送機 C-46 D の断面積は 100 m² とみてよい。この値は B-727 の 200 m² に対して、2 : 1 の関係にある。一方、両方の飛行機に関して、寸法諸元の中から 2 : 1 になるものを探してみると、表 1 に示したように、飛行

表 1 飛行機の側方散乱断面積
Bistatic radar cross sections of aircrafts.

機 種	寸 法			側方断面積 (m ²)	備 考
	全長(m)	全幅(m)	面積(m ²) (全長×全幅)		
C-46D	23.3	32.9	766.6	1	100 測定値
B-727	46.7	32.9	1,536.4	2	200 C-46Dの値と文献 6), 7) から推定値
B-747 (ジャンボ)	70.5	59.6	4,201.8	5.5	550

機の全長×全幅がちょうどその関係になっている。大型の飛行機ほど断面積が大きいとすることは正当であろうし、全長×全幅が飛行機の大きさの程度を表わすひとつのパラメーターであるとするのも妥当であり、断面積

がこのパラメーターに比例するとする上記の結果も、認めるものと考ええる。この方法を用いて、ジャンボジェット機 B-747 の断面積を推定してみると、全長×全幅は C-46 D の 5.5 倍であり、したがって、断面積 550 m² を用いればよいことになる。

5.2 受信空中線の指向特性

飛行機フラッターは直接波（正規波）と妨害波（飛行機による散乱波）との干渉によっておきるのであるから、両者の到来角の相違を利用し、指向性の鋭い受信空中線を用いることによって、妨害波の実効的な強度を抑圧することができれば、飛行機フラッターを軽減できることになる。次に、受信空中線の指向性を鋭くすることによる効果を計算例によって調べてみる。

計算に際して仮定した指向特性は図 4 に示したとおりである。図 4 (a), (b) は広帯域 8 素子八木空中線のテレビローチャンネルに対する指向性に相当し、図 4 (c) は垂直指向性が図 4 (a) の水平指向性と同程度のビーム幅となっており、しかもビームを 10° 下向きにティルトさせた仮想的な空中線である。すなわち、フラッター防止空中線として用いられている受信空中線の原理を想定している。

さきに示した計算例、すなわち図 5 では、空中線の特性として図 4 (a), (b) を想定して計算したものである。垂直指向性を鋭くした図 4 (a), (c) を想定して、図 5 に対応する計算を行った結果が図 7 である。

図 5 (a) と図 7 (a) を比較すると、飛行機が受信点上空付近にあるときについては確かに電界変動幅が減少し、改善効果が認められる。なお、図 7 (a) の横軸の尺度をはかの図の場合と変えてある。これは、このプログラムでは任意の尺度を選ぶことができることを示すためである。

図 5 (b) と図 7 (b) の比較では、両者の相違をほとんど認めない。図 4 (c) のような垂直指向性の改善された空中線を用いても効果がないということは、受信空中線の指向性を利用する飛行機フラッター改善策は必ずしも効果を期待しえないことを示している。

6. む す び

以上、飛行機フラッターの計算プログラムについて説明し、このプログラムによる数例の計算結果を示し、また実測例との照合を行った。飛行機の散乱特性を表わすパラメーターとして、側方散乱断面積を用いるが、TV ch-1 での

(a) 飛行コース (I), 高度 350 m, 受信点 A, 飛行機一送信点間大地反射波無視

(b) 飛行コース (II), 高度 50 m, 受信点 B, 全大地反射波を考慮

図 7 垂直指向性の鋭い受信空中線を仮定したときの計算例

Examples of calculation in case of using vertically sharper directive antenna than in fig. 5 and fig. 6.

実測の対象とした C-46 D 型輸送機の場合, その値として, 100 m^2 一定と考えてよいことがわかった。

また, この結果および文献に現われた飛行機の後方散乱断面積の値や後方散乱断面積と側方散乱断面積の関係などから, 飛行機の側方散乱断面積を表わすパラメーターとして全長×全幅をとること, そして断面積がこのパラメーターにほぼ比例すると考えることが妥当であることが推定された。

飛行機フラッターによる電界変動を軽減するために, 受信空中線の指向性を鋭くすることは, 効果なしとはいえないが, 多くを期待することはできない。したがって, 飛行機フラッターに強い受信機の回路構成の検討が要請される。

(昭和 48 年 10 月 31 日受付, 昭和 48 年 12 月 19 日再受付)

〔参 考 文 献〕

- 1) 伊藤士郎ほか: 電界強度地図の自動作成, 昭 46 年電気四学会連大, 248
- 2) C. R. Burrows: Radio Wave Propagation, Academic Press, New York (1949)
- 3) A. Kinase: Influences of Terrain Irregularities and Environmental Clutter Surroundings on the Propagation of Broadcasting Waves in the VHF and UHF Bands, NHK Technical Monograph, 14 (1969)
- 4) 中村秀夫: 航空機によるフラッター障害, 昭 46 NHK 全国技術報告会
- 5) D. E. Kerr: Propagation of Short Radio Waves, Radiation Laboratory Series, 13, McGraw Hill (1951)
- 6) F. E. Nathanson: Radar Design Principles, McGraw Hill (1969)
- 7) J. W. Cripin, et al: Radar Cross Section Estimation for Complex Shapes, Proc. IEEE, 63, 8 (1965) 972-982

訂 正

本誌前号 (特集: 画像とコンピューター) 2—5「X線像の自動診断」に次のとおり誤植がありましたので御詫びと共に訂正いたします。

30 ページ 写真 1 (c) → (b)
(b) → (c)