

## 10. ILS GPの近傍モニタによる遠方特性推定

機上等技術領域 ※田嶋 裕久、横山 尚志、朝倉 道弘  
青森大学 中田 和一

### 1. はじめに

現在、空港への着陸誘導には主に ILS (Instrument Landing System: 計器着陸システム)が使用されている[1]。今後は、高カテゴリーの着陸も衛星を利用した GBAS(Ground Based Augmentation System)機上装置が新規に導入される航空機から順次搭載されてゆくとしても、現在の航空機の多くは退役するまで ILS を利用し続けることになる。また、ILS は GBAS のバックアップとしての意味もあり、今後数十年は ILS も併用されると予想される。

空港に設置されている ILS の高カテゴリー運用においては高い完全性 (Integrity,  $1-0.5 \times 10^{-9}$ ) と継続性 ( $1-2 \times 10^{-6}$ ) が要求されている。航空機が着陸中に規定を逸脱する信号が送信された場合、致命的な事故につながる。完全性とはこのような事故を防止するため、異常な信号を見逃すことなくモニタで検出する能力である。一方、正常なのに異常と誤って判定して運用停止した場合は継続性が低下する。モニタとしては完全性と継続性を高めるため、航空機で表示される遠方特性との相関を高める必要がある。

水平方向の誘導を行う ILS ローカライザでは遠方にモニタを設置することが可能である。一方、垂直方向の誘導を行う GP(Glide Path)は 330MHz 帯の電波で地面反射のイメージも利用して航空機の進入角 3 度方向にパターン形成している。GP では、高いモニタアンテナは航空機の障害となるため遠方モニタを設置することが不可能であり、近傍モニタが使われている[2]。

ILS の近傍モニタでは遠方の信号との相関が不十分なため、送信アンテナに内蔵されるピックアップにより遠方と等価の信号を合成するインテグラルモニタも使用されている。これは、送信装置の障害については検出できるが、アンテナ周辺環境である地面反射に影響する積雪状態の変化などの影響は検出できない。そこで、現在 1 個のアンテナで行っている近傍モニタを多素子アンテナに拡張し、遠方特性の推定方法について検討した。

### 2. ILS GP のパスの距離に対する変位特性

広開口のアンテナからの放射される電波は、アンテナ近傍においては近接効果により、遠方領域でのアンテナパターンとは異なっている。この違いのため、近傍のアンテナを用いて無線機器を監視した場合の電波特性と、遠方における実際の電波特性とは違いが生ずる。

ILS GP は一般に仰角  $3^\circ$  の進入角のパスを形成し、航空機がこのパスを中心に上下に変位した場合、CDI(Course Deviation Indicator)に変位に応じた表示を行う。GP の上のアンテナ素子の地上高はナルリファレンス型で約 8.7m あり、2 周波型ではその 1.5 倍となる。そして、GP は地面反射を利用したアンテナであるため、アンテナのイメージも含めた開口長は 2 周波型では 26m になる。遠方においては、各送信素子からの経路は平行とみなせるが、近づくに従って位相関係が変わってくる。

GP は遠方において  $3^\circ$  を中心に  $\pm 0.36^\circ$  の変位に対して CDI の変位が所定の値になるように感度を調整している。図 1 にナルリファレンス型 GP のパスの距離に対する変位特性の計算値を示す。同図の 3 本のプロットは  $3^\circ$  と  $3+0.36^\circ$  ,  $3-0.36^\circ$  のパスにおける CDI の値を示している。遠方においては CDI の変位感度はほぼ一定であるが、距離 120m 付近では変位感度が 0 になり、さらに近付くと感度が反転している。GP の近傍モニタはこの反転している領域で変位感度が高い場所に設置する。

GP の近傍モニタは遠方と感度が反転しているのみではなく、近接効果により送信素子間の位相関係が遠方と異なっているため、障害等による変動にも違いが生ずる。

### 3. 遠方特性の推定原理

ILS GP モニタアンテナ位置関係を図 2 に示す。点 P で受信した場合、アンテナからの直接波とイメージアンテナから放射されるとみなせる反射波が合成され次式のように表される。

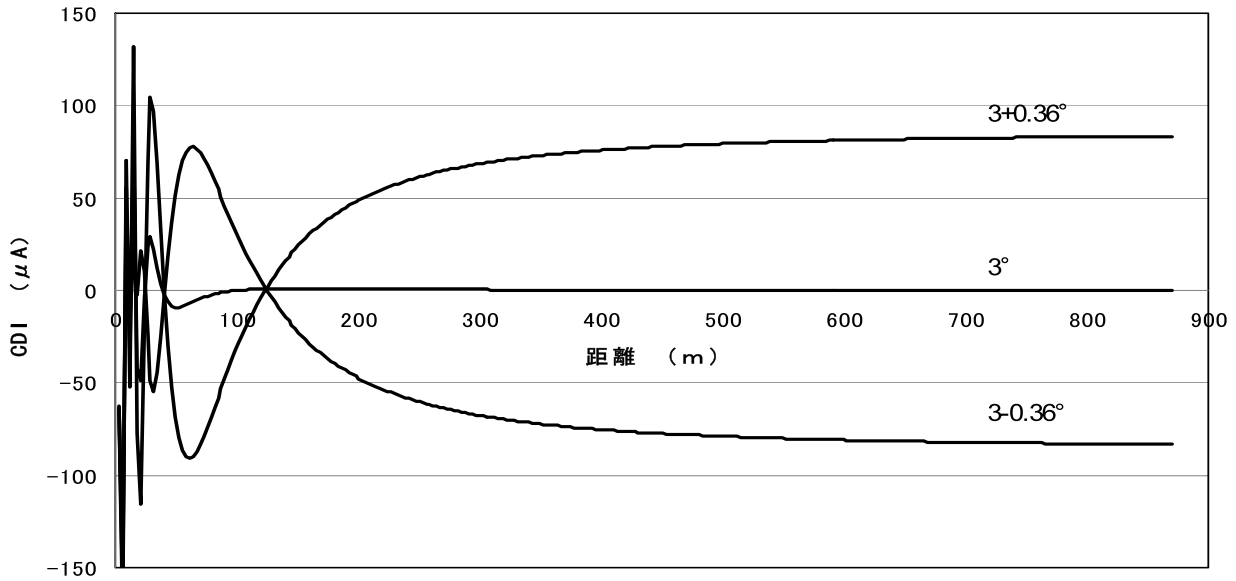


図1. ILS GP の距離に対する表示感度の例（計算値）

$$s = C\sqrt{T} \sum_{i=1}^n R_i \sqrt{G_{ti} G_{ri}} \frac{e^{jk d_i}}{d_i} a_i \quad (1)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} \quad C = \frac{\lambda\sqrt{Z}}{4\pi} \quad (2)$$

ここで、 $s$  は図2の受信点Pの受信アンテナにおける電圧、 $C$  は定数、 $T$  は送信電力、 $n$  は送信アンテナの素子数、 $i$  は素子番号、 $a_i$  は  $i$  番送信素子の信号の複素係数、 $d_i$  は素子  $i$  と受信点までの経路長、 $R_i$  は実際の素子では1でイメージ素子の場合は地面の反射係数、 $G_{ti}$ 、 $G_{ri}$  は送信と受信の素子の電力利得、 $k$  は波数を表す。

アレイアンテナモニタとして  $m$  個の素子を配置した場合、各素子の式(1)で表される電圧ベクトル  $s = [s_1, s_2, \dots, s_m]$  は次のように表せる。

$$s = Fa \quad (3)$$

ここで  $F$  は伝搬係数を表す複素係数行列であり、 $i$  番送信素子から1番受信素子への伝播を示す要素  $f_{il}$  は式(1)より、次のように定義される。

$$f_{il} = C\sqrt{T} R_{il} \sqrt{G_{ti} G_{ri}} \frac{e^{jk d_{il}}}{d_{il}} \quad (4)$$

$a$  がイメージ素子も含めて6素子の2周波型GPの場合、式(4)の連立方程式は6素子のモニタアレイアンテナで受信すれば、 $a$  を求めることが可能となる。

$$a = F^{-1}s \quad (5)$$

遠方のある1点における信号  $S_f$  は式(3)と同様に表し、式(4)もあわせて次のようになる。ここで上添え字の  $T$  は転置を示す。

$$s_f = f^T a = f^T F^{-1}s = m^T s \quad (6)$$

$$m^T = f^T F^{-1} \quad (7)$$

$m^T$  は6要素の行ベクトルである。式(6),(7)は連立方程式を解いて、それを基に遠方解を計算する事を示している。そして、6素子のモニタアレイアンテナに6入力から1出力への合成係数がベクトル  $m$  で表わされる信号合成器を接続して、信号を合成するとこの演算を実現できることを示している。

式(3)の  $F$  が定数であれば、式(6)により遠方界

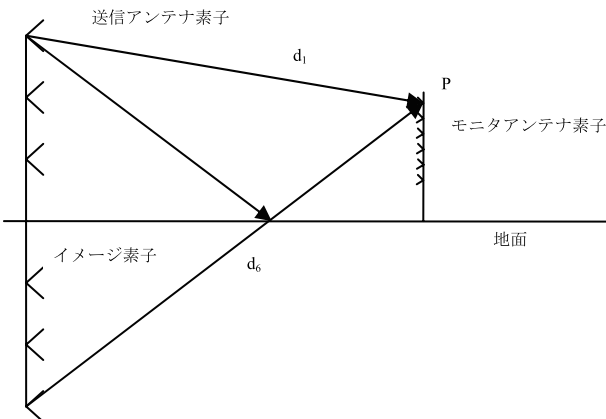


図2. ILS GP モニタアンテナ位置関係

は正しく推定できるので、送信機や給電系の障害に関して理論的にはアレイのモニタは遠方界と一致する。図3にGPの下段送信アンテナに位相誤差がある場合のシミュレーション結果を示す。遠方界(Far)と従来の近傍モニタ(NFM)は異なっているがアレイのモニタは一致している。

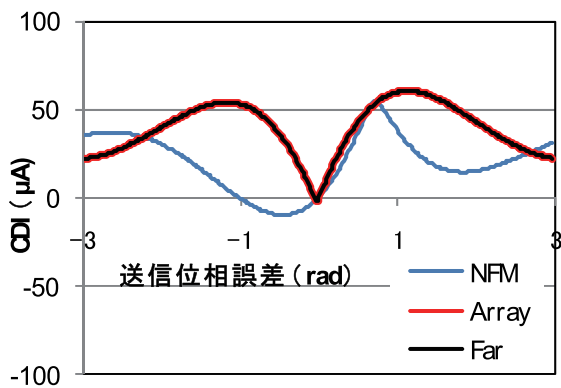


図3 アンテナ位相誤差とモニタ特性

しかし、積雪の状態の変化などにより  $d$  や  $R$  が変わると  $F$  が変わるので式(6)に誤差が生ずる。図4に誘電率 1.2 の積雪深を変化させた場合のシミュレーション結果を示す。

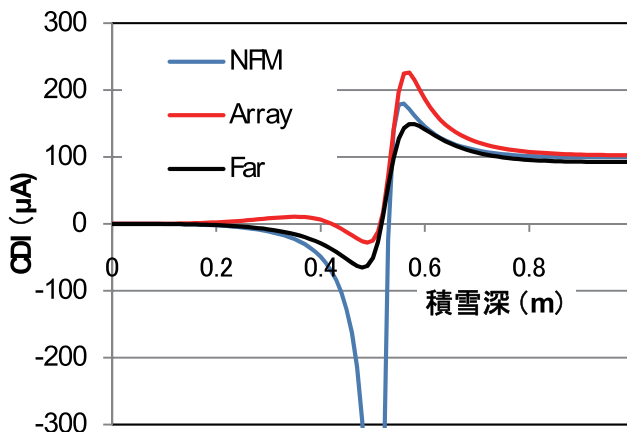


図4 アンテナ位相誤差とモニタ特性

図4の例では近傍モニタで大きな誤差が見られるが、この特性は雪の誘電率によっても変わり、NFMの方がアレイモニタより遠方界に近い場合もある。

#### 4. スケールモデル実験

実際のGPで実験する前に、基本的な測定と

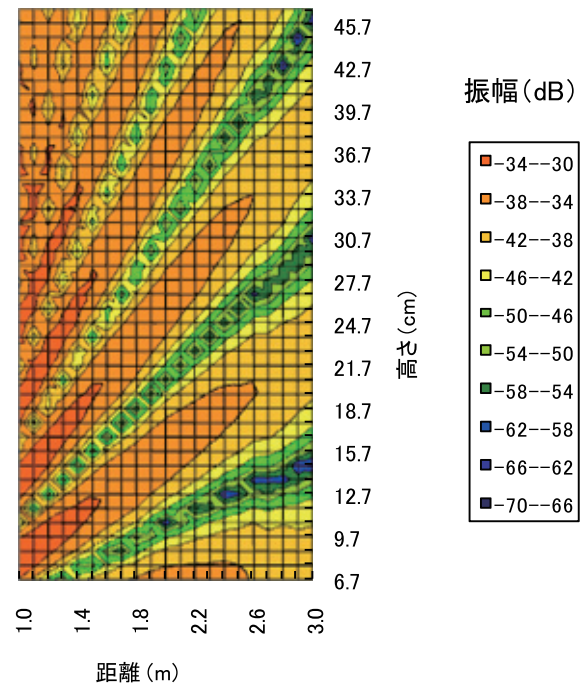


図5 垂直面振幅分布

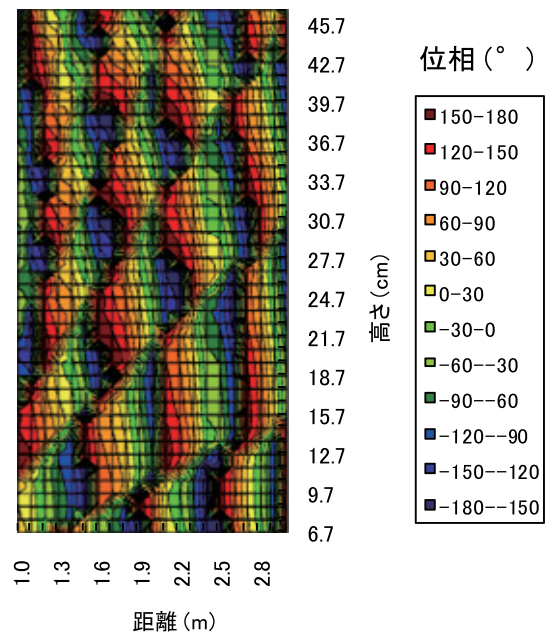


図6 垂直面位相分布

アレイのモニタを実現するための問題点を調べるため、当研究所の電波無響室においてスケールモデル実験を行っている。現在はナルリファ

レンズ型 GP スケールモデル実験を行っている段階であり、今年の3月に第1回目の実験を行った。GPの実験モデルは9.6GHzを使用し、波長の縮尺から実機の29分の1の大きさとなる。GPアンテナの前方の電波の振幅と位相を確認するため、受信アンテナを移動架台で動かしながらネットワークアナライザで測定した。サイドバンドアンテナの放射電界の振幅と位相の測定結果を、それぞれ図5と図6に示す。横軸は送信アンテナからの水平距離で、縦軸は地面を模擬したアルミ板からの高さである。3°のパスとその整数倍の高さで理論通り図5の振幅にナルが形成され、図6の位相はナルで反転していることが分かる。

また、この測定を行った時の状況を図7に示す。

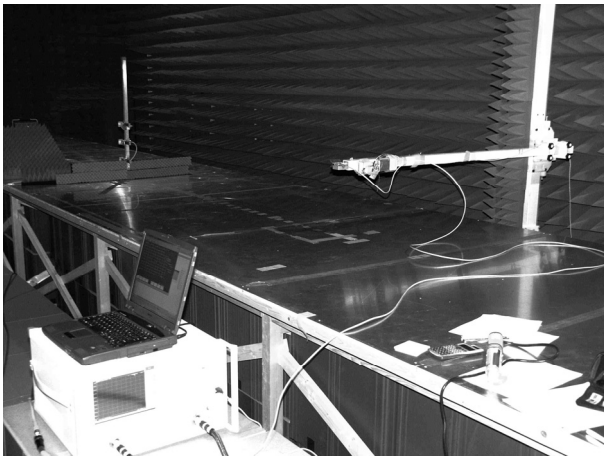


図7 GPアンテナの前方の振幅と位相測定

図8に実験用モニタモデルのコーナーレフレクタアンテナアレイを設置した状況を示す。

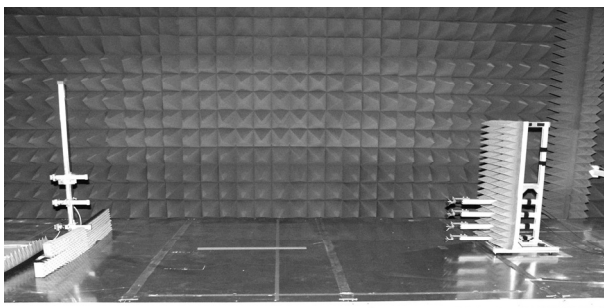


図8 GPアンテナ(左)とモニタアンテナ(右)

空港内に設置するモニタアンテナの高さは低いほど望ましいが、アレイの素子間隔を小さくすると、図9に示すように送信パラメータの推

定誤差が大きくなるため、適切な値とする必要がある。

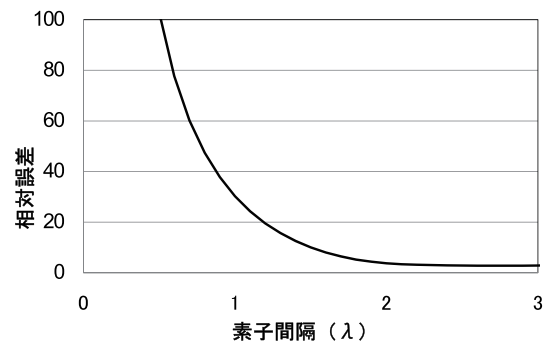


図9 モニタ素子間隔と推定誤差（計算値）

アンテナ素子の位置誤差や信号合成器の誤差もあり、モニタ設置の際に信号合成器の位相振幅パラメータの調整が不可欠である。第1回目の実験においては、信号合成器の可変位相器と可変アッテネータの微小変化とCDIの値から最小2乗法により誤差を推定し、ニュートン法による収束を試みたが、誤差の初期値が大きく正しい状態までは収束しなかった。今後、対策を検討しさらに実験する計画である。

## 5. まとめ

ILS GPの近傍モニタにおける近接効果を低減し遠方界との相関を向上するため、アレイアンテナによる近傍モニタを開発している。複数の受信素子の信号を基に、信号合成器のパラメータの設定により連立方程式を解き、遠方界を推定できる可能性をシミュレーションにより確認した。受動部品で構成する単純なモニタであるため、信頼性の低下を抑えることができる。実際にはアンテナ素子の位置誤差や信号合成器の誤差もあり、推定精度を実用レベルに上げる必要がある。また今後、積雪等の状態の変化などによる誤差の低減も検討する計画である。

## 参考文献

- [1] 川田輝雄：“航空無線工学概論”，鳳文書林出版販売，平成15年4月
- [2] 中田，戸川，横山：“積雪時のGP-NFM反射面についての検討”，信学論，2004，6，pp. 910-912