

21. モードS信号を用いた受動監視のマルチパス誤差評価

機上等技術領域

※田嶋 裕久

古賀 禎

小瀬木 滋

1. はじめに

空港面等の航空機の監視にはそれぞれの位置の他、個々の航空機の識別が必要となる。現用の一次レーダの一種であるASDE（空港面探知レーダ）では航空機の識別情報は得られないため、この識別には他のシステムからの情報と照合する必要がある。このため、空港面等の航空機の監視により効果的な方法が期待されている。しかし、新たな装備を航空機に搭載するには多大なコストと時間を必要とする。

当研究所では、ほとんどの旅客機に搭載されている航空機衝突防止装置(ACAS)又はACASと組み合わせて使用されるモードSトランスポンダの電波を利用した空港面上の受動測位に関する研究を行っている。これまでの実験結果は平成15年から17年の当研究所の発表会において報告している[1][2][3]。ここでは主に空港内において測位誤差の要因となるマルチパス時間検出誤差に関するシミュレーション等による検討結果に関して報告する。

2. 測位原理

本方式の測位原理は、航空機が平面上にある場合その周辺に3箇所以上の受信アンテナを配置し、電波の相対到着時刻を測定する。それぞれのアンテナと目標の電波発信源との相対距離に変換し、目標の位置を算出できる。測位原理は電波の流れが逆であることを除いてGPS(Global Positioning System)と同様で、測位の計算式においてもGPSと同様であるため、逆GPSと呼ぶこともできる。測位誤差の目安もGPSと同様に測距誤差と、目標と受信アンテナの位置関係で決まるDOP(Dilution Of Precision:精度低下率)の積となる。測距は電波の伝播時間を信号の時間検出で行う。一般に波形の変化が急峻なほど時間検出誤差は小さくなり、そのような波形では帯域幅は広くなる。従って、帯域幅の広い信号が時間の検出に適している。空港面において航空機が送信する電波としては、ACASの1030MHzの質問信号が最も帯域が広い。ICAOの規定で比較すると、中心周波数から約20dB下がる帯域幅はACASの

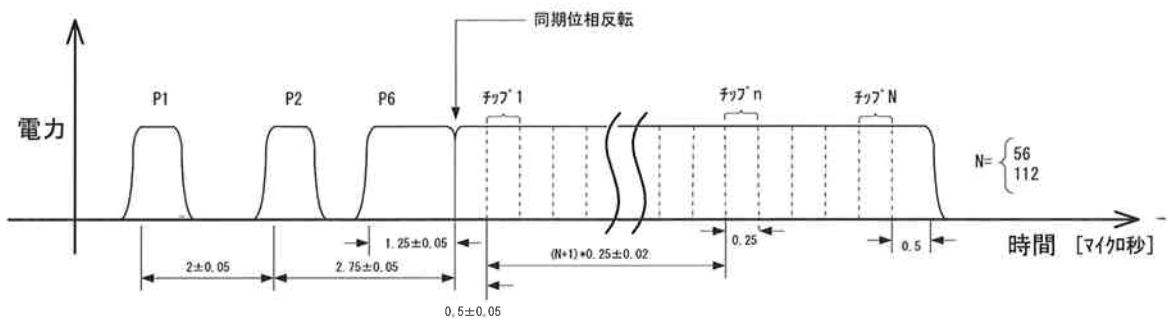


図1 ACASの質問信号形式

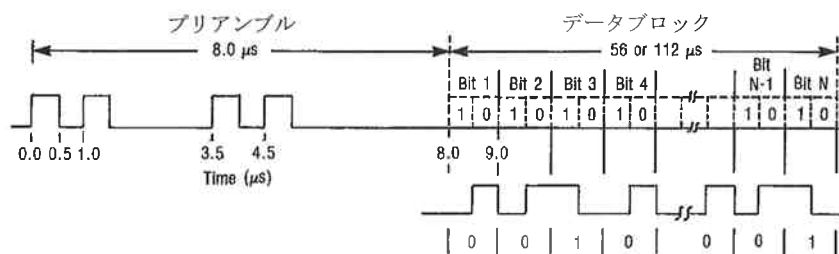


図2 モードS応答信号形式例

1030MHzで20MHz、モードSの1090MHzの応答は14MHz、DMEは1.1MHz以内となっており、ACAS質問信号または、モードS応答信号を利用することによりDMEよりも測距精度を期待できる。図1に示すACASのモードS質問信号のP6パルスの急峻な同期位相反転の波形を利用して、GPSと同様に相関により受信信号の到着時間差を検出する方法について最初に検討した[1][2]。

しかし、受動測位ではブロードなパターンのアンテナを使用すること、空港内においてはマルチパスの原因となる建物や他の航空機による誤差を軽減することが重要である。マルチパスの軽減には、精密距離測定装置(DME/P)で採用されたDAC(Delay Attenuate and Compare)法[2]も実用上有効な方法として検討した。これは直線的に立ち上がるパルス波形の時間検出に適した方式で、図3に示すように受信波形を τ 時間遅延させた波形とA倍($A < 1$)した波形を比較し、交わる点を時間検出点とする方式である。



図3 DACによるパルスの検出

DACにおいては、遅れて受信されるマルチパス波が重畳する前の最初のP1パルスの立ち上がり部分において時間検出を行うことによりマルチパスの影響を軽減できる。図1のACAS質問信号と、図2のモードS応答信号のパルスの立ち上がり時間の規定は同じであるため、どちらにおいてもDACの効果は同様である。

3. マルチパス誤差シミュレーション

ACAS質問送信機の送信出力端子から直接ケーブルで接続し、RF送信信号波形データをデジタルオシロスコープにより記録し、この波形データを基にして数値計算シミュレーションによりマルチパス誤差特性を算出した。マルチパスの状態を示すパラメータとしてはM/D比(Multipath to Direct signal level ratio)、直接波に対するマルチパス波の遅延時間と搬送波の位相差がある。

図4に相関法におけるM/D=0.5、すなわち希望波の1/2のマルチパス波が混入した場合のマルチパス誤差特性を示す。この横軸は直接波に対するマルチ

パス波の遅延時間であり、直接波に対するマルチパス波の搬送波の位相差を0から π まで5段階に変えた状態を示している。縦軸はそれに対応する時間検出を距離に換算した誤差で、1nsは0.3mの距離誤差に相当する。図5はM/D=1.5の場合で誤差が大きくなる結果を示している。M/Dが1を超える状況は空港面上ではめずらしくない。これは例えば、直接波が地面反射によるロービングや他の物体による遮蔽により弱められた状況において高い建物などからの強い反射波が受信されるような場合である。

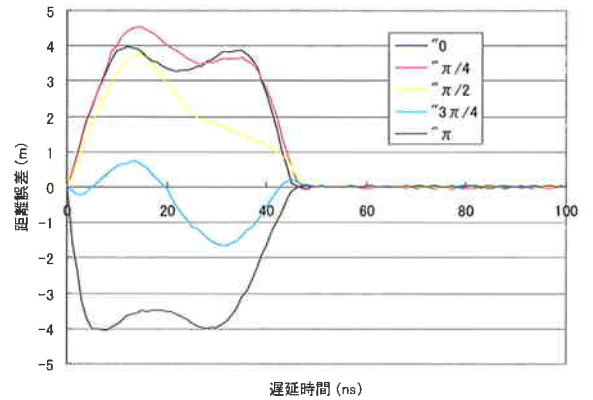


図4 マルチパス誤差 (相関法、M/D=0.5)

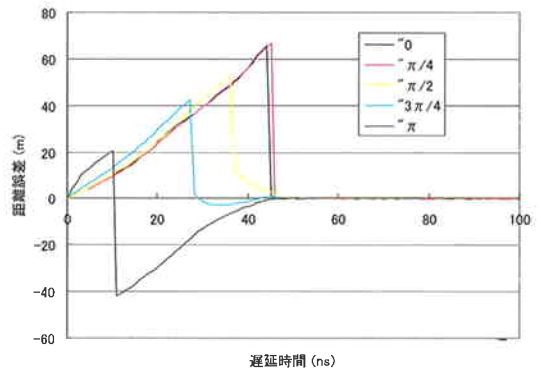


図5 マルチパス誤差 (相関法、M/D=1.5)

DAC法におけるM/D=0.5とM/D=1.5のマルチパス誤差特性を図6と図7にそれぞれ示す。ここではDAC処理の遅延時間は20ns、減衰量は0.5としている。

これらの結果を比較すると、相関法に比べDAC法ではマルチパス誤差が半分以下に軽減され、マルチパスが重畳する可能性の低い波形初期の部分で時間検出するマルチパス軽減効果は明らかである。また、このシミュレーションはACAS質問信号波形で行ったが、パルスの立ち上がり時間の規定は同じであるため、モードS応答信号においてもDACの効果は同様である。

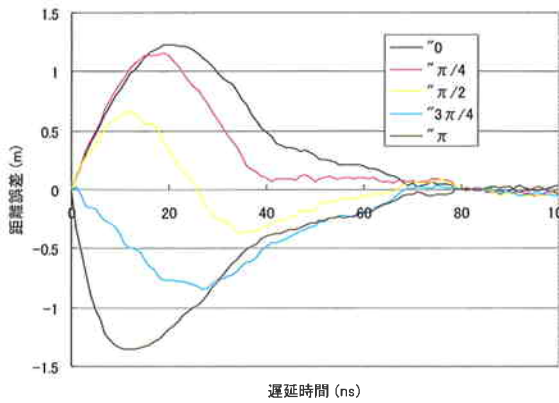


図6 マルチパス誤差 (DAC法、M/D=0.5)

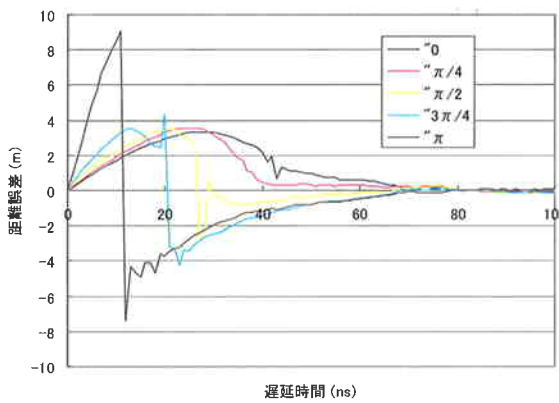


図7 マルチパス誤差 (DAC法、M/D=1.5)

4. 仙台空港における実験結果の検討

本研究において、マルチパス環境下での高性能測位方式として、受信局間の信号伝送に光ファイバ信号伝送技術を用いる受動型監視システム OCTPASS (Optically Connected Passive Surveillance System) を考案した[3]。平成17年度に受信利得を自動的に調整するため、受信される信号毎にフィードフォワード制御により瞬時に制御する 1090MHz 受信機を試作し、実験システムに加えて実験を行った。実験場所は平成16年度とほぼ同様に仙台空港 B 滑走路東側において3局の受信局を仮設して、航空機目標を模擬したモード S トランスポンダを車両に搭載して走行させ、1090MHz のスキッタ信号を受信局から光ケーブルで伝送し収集した。しかし、光伝送装置の故障のため S/N が悪い受信局があり、この測定データの測位処理については現在検討中である。

図8にトランスポンダの送信信号を示す。同図では、I-CH、Q-CH、それらを合成した振幅の絶対値を示している。位相が時間とともに回転しているの

が分かるが、これは送信周波数が 1090MHz から 400kHz 程度ずれていることによる。図9に仙台空港において受信した信号の例を示す。

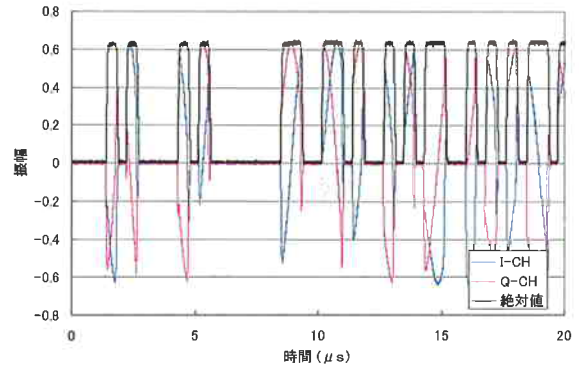


図8 送信波形

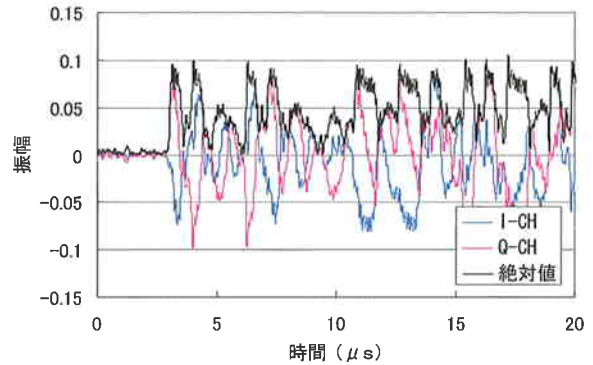


図9 受信波形の例

図9では、空港面上ではマルチパスによる遅延した波形が複数重なり振幅と位相共に乱れている。しかし、最初のパルスの立ち上がり部分は乱れが少ないので、DACによる時間検出が有効であることが分かる。

図10において平成16年度に行った測位結果[3]に、赤丸の位置に目標がある場合、マルチパスの遅延時間に対応した楕円の例を示す。これは、目標位置と受信局の1個を焦点として遅延時間を設定して描いたものである。図6において比較的マルチパス誤差の大きい範囲は 2ns から 40ns に限定されることから、図10においてこの2種類の楕円の間にある障害物の影響が大きく、それ以外の部分にある反射物の影響は軽減される。目標が図10の赤丸の位置にある場合、スポットに駐機している航空機は 40ns の楕円に入るが、受信局方向への反射波が少なかったので大きな誤差は見られない。ターミナルビル等の近くの構造物は 40ns の楕円の外になるので影響は少ないが、目標がさらにスポット側に近づい

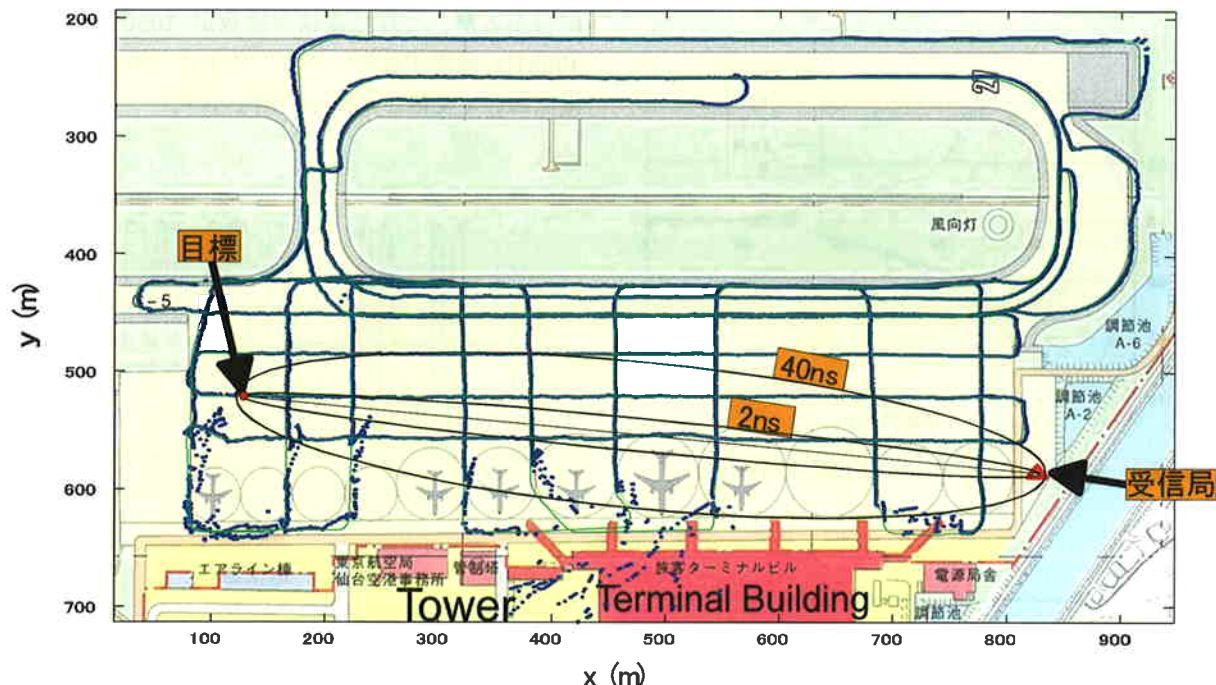


図10 DAC法における水平面のマルチパスの時間差の例

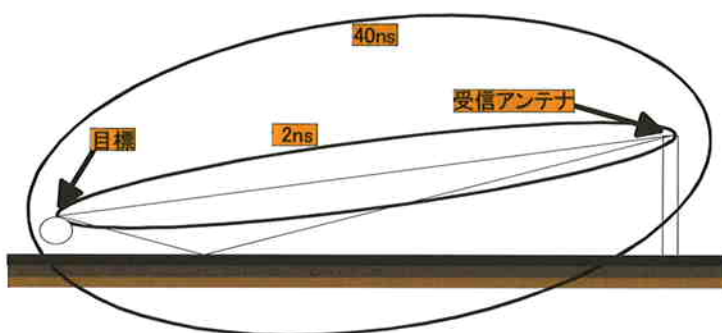


図11 地面反射のマルチパスの時間差の例

た場合影響は避けられない。図10でスポット付近で誤差が大きい原因は、目標と受信局との間に駐機中の航空機で直接波が遮蔽されたことにターミナルビル等の反射波が加わり、M/D比が特に悪くなったと考えられる。このような場所を除けば、空港面監視の要求精度を満たしている[3][4]。

垂直面においてマルチパスとしては最も大きい地面反射について、距離100m、目標のアンテナ高8m、受信アンテナ高20mの例を図11に描いた。この場合は地面反射による遅延は2nsから40nsの範囲に入り、影響が避けられないことが分かる。2nsに収まるように受信アンテナ高を下げればマルチパス誤差は減少するが、遮蔽やロービングによる信号レベルの低下の問題がある。

5. まとめ

相関法とDAC法のマルチパス誤差特性のシミュレーションによる比較では、DAC法がマルチパス誤差を1/2以下に低減できる効果があることを明らかにした。また、空港面においてマルチパスの遅延時間によりDACに影響する障害物の範囲が限定されるが、地面反射の影響は考慮する必要がある。

今後、さらに実験と時間検出等の処理について検討し、実験システムの改善を行う予定である。

謝辞

実験に御協力いただきました仙台空港事務所、当研究所の岩沼分室職員他、関係各位に感謝いたします。

参考文献

- [1] 田嶋、古賀、小瀬木、“ACAS受動測位方式の実験と検討”，電子航法研究所発表会講演概要，H15.6
- [2] 古賀、田嶋、小瀬木、“ACAS信号を用いた受動型測位方式の評価実験”，電子航法研究所発表会講演概要，H16.6
- [3] 古賀、田嶋、小瀬木、“光ファイバ信号伝送技術を使用した受動型監視方式の実験結果”，電子航法研究所発表会講演概要，H17.6
- [4] EUROCAE, "MOPS For Mode S Multilateration systems for use in ASMGCS," Nov.2003.