

1. 航空機からのGPS掩蔽観測技術の開発について

航空システム部 藤井直樹 吉原貴之 齊藤真二
衛星技術部 星野尾一明 松永圭左 坂井丈泰

1. はじめに

「航空機からのダウンルッキング(DL)-GPS掩蔽観測技術の開発」[1,2]に関する研究（以下、本研究という）は洋上の水蒸気垂直プロファイルの観測を行うために、航空機からのDL-GPS掩蔽観測技術を世界に先駆けて開発することを目指した研究である。GPS掩蔽法はGPS衛星から発射される電波の大気伝播遅延量を計測することにより大気の水蒸気等を求める手法で、地球環境の計測などに使われる。本研究は、科学技術振興調整費による「先導的研究等の推進」において平成14年度から16年度に実施され、地球環境を長期的に監視するキャリブレーション・フリーの地球観測技術の開発を目指した「精密衛星測位による地球環境監視技術の開発」において、京都大学、情報通信研究機構、気象研究所などと共同で行われたサブテーマ1の「GPS掩蔽法を用いた地球大気圏モニタ技術開発」の一環として実施された。

サブテーマ1では、航空機から掩蔽観測を行うために、新世代GPS受信機などのDL掩蔽観測用受信システムの開発を電子航法研究所が、GPS掩蔽観測に必要な電離圏モデルの開発を京都大学理学部と情報通信研究機構が、LEO-GPS掩蔽観測を実施するために、衛星搭載型GPS受信機などをEQUARS衛星への搭載するための作業およびGPS掩蔽観測データの解析アルゴリズムの開発を京都大学生存圏研究所が、LEO-GPS掩蔽観測の解析結果を気象機関にリアルタイムで配信するシステムの試作を情報通信研究機構が、並びに、GPS掩蔽データを気象数値モデルへデータ同化するソフトウェアシステムの研究を気象研究所および気象庁が行うこととなっている。

当所が担当した「DL掩蔽観測用受信システムの開発」では、この研究に不可欠な航空機用DL-GPS受信機と航空機高精度位置速度計測システムの開発を行うとともに、飛行実験を実施

し、開発したDL掩蔽観測用受信システムの評価を行うとともに、収集したデータを京都大学生存圏研究所と気象研究所に提供することによって、水蒸気垂直プロファイルの導出技術の開発に寄与し、「航空機からのDL-GPS掩蔽観測技術」に対する実証を行う。将来の研究成果としては、民間航空機によるGPS掩蔽観測により得られたデータを気象数値予報モデルに配信し、予報精度の向上を目指している。航法部門への波及効果としては、航空機の高精度の位置と速度の計測技術の確立、アベイラビリティ向上に必要な低仰角における電離圏・対流圏の伝播現象の把握、さらに、GPSのL5信号などに対応した我が国における高感度・高精度2周波受信機の開発などが期待できる。

2. DL掩蔽観測用受信システムの開発

2.1 航空機用DL-GPS受信機

航空機用DL-GPS受信機(以下、掩蔽受信機という)は、航空機用ダウンルッキング掩蔽受信機本体(掩蔽観測用高サンプリング1周波GPS受信部、位置決定及び電離層補正用2周波GPS受信部)、コンソール部及び基準周波数発生部から構成される。基準周波数発生部は、ルビジウム発振器を使用し、掩蔽受信機の本体と別途開発した航空機高精度位置速度計測装置に精密な10MHzの基準信号を供給する。掩蔽受信機の特徴は、航空機に搭載型であり、測位機能に加え、掩蔽観測に必要な低仰角及び俯角から到来する微弱なGPS衛星電波信号を可能な限り追尾し、観測量となる搬送波位相変化量を高精度でサンプリングすることである。そのために、掩蔽観測用の受信RF回路と位置決め用の回路を持つ2フロントエンドの受信機を主装置として、電離層遅延量を補正するための2周波受信機を2基と組み合わせた装置になっている。掩蔽受信機は微弱な電波を受けるためにアナログ部とデジタル部を完全に分離して、アナログ部に対する

デジタル部からの干渉を出来るだけ排除する構造を持つとともに、突発性の雑音などで捕捉追尾が外れた場合に引き続き追尾する信号を予想し再捕捉する機能を有している。さらに、電離層シンチレーションなどの電離層・対流圏の変動による受信強度変動を測定するためのIFのI, Qチャンネルの出力機能を有している。

工場内のGPS信号シミュレータを使った掩蔽受信機の精度および感度の試験では、擬似距離に対する標準偏差は位置決め用の回路で1.46m, SIDEアンテナ用回路で1.48mであった。搬送波(ADR)に対する標準偏差はTOPアンテナ用回路で2.6mm, 掩蔽観測用の回路で2.5mmであった。同時に行った受信感度に関する実験では、一般的な受信機の最低受信感度の規格である-130dBmに比べ、13dB良い-143dBmを記録した。

2. 2 航空機高精度位置速度計測システム

航空機高精度位置速度計測システム(以下、速度計測システムという)は、航空機の位置、速度を高精度に計測するための航空機に搭載する装置であり、GPSデータとGPSに同期した慣性計測装置(IMU: Inertial Measurement Unit)のデータを結合処理することにより、航空機の位置、速度を高精度に得るものである。IMUはリング・レーザ・ジャイロ(RLG)とサーボ型加速度計を組み合わせた日本航空電子工業製のRLG運動計測装置(JIMS-250R)が使われ、搭載された運動体等(車両、船舶、航空機等)の姿勢角、方位角、3軸角速度、3軸加速度等を高精度で計測することができる。GPS受信機を併用するGPS-IMUハイブリッドモードでの計測も可能である。

工場内におけるジャイロに対する試験では、バイアス $0.005^{\circ}/h$ 以下、ランダムドリフト $0.0013^{\circ}/\sqrt{h}$ 以下、加速度計に対する試験ではバイアス $45\mu G$ 以下、軸のアライメント誤差は $1.5mrad$ 以下であった。

3. DL掩蔽観測用受信システムの評価

3. 1 航空機からのDL実験

GPS-DL掩蔽観測用受信システムの評価およびGPS掩蔽データの収集のために、本システム

を当所の実験用航空機Beechcraft B99 Airlinerに搭載した。GPS掩蔽観測用の水平方向に向けたDL-GPSアンテナを実験用航空機のノーズレドーム内に左右1式ずつ取り付けた。

平成15年10月から平成17年3月にわたり、計46フライト、おおよそ130時間の飛行実験を行い、主に水平線に沈んでいくGPS衛星を観測目標として、1回のフライトで1~3プロファイル・データを取得した。飛行実験時には、ベースとなる空港および飛行経路上に高精度測位用の10Hzサンプリング基準点を数点設置した。

3. 2 掩蔽受信機の飛行評価

掩蔽受信機による、観測目標のGPS衛星信号を低仰角まで追尾できた事例として、2004年7月1日のGPS-PRN番号7番の衛星を目標とした高知上空から宮崎沖まで南西方向のコースを飛行したときの観測データを図-1に示す。図-1は、航空機に横向きに設置してある掩蔽観測用アンテナを使い、追尾しているGPS衛星のドップラシフト量と仰角の関係を示している。ここにおけるドップラシフト量とは観測されたGPS搬送波ドップラシフト量から、GPS衛星および実験機の移動による影響を除いたものである。この量は通常はゼロとなるものであるが、GPS信号の伝搬経路が延びていく場合には負の値となる。汎用の2周波受信機では仰角 -1.5 度までしか観測できなかったが、掩蔽観測用の1周波受信部は約 -4.5 度まで観測を続け、大きなドップラシフトを記録した。また、位置測定用アンテナでは仰角 -0.5 度以下では頻繁に信号が途切れたが、掩蔽観測用アンテナでは掩蔽GPS衛星の信

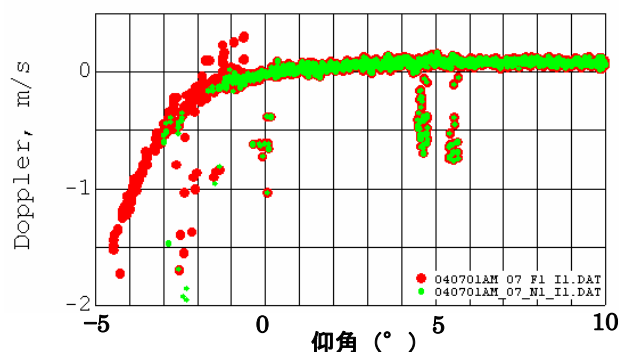


図-1 2004年7月1日の飛行実験における、GPS信号のドップラシフト量と仰角の関係。(赤)1周波用受信部、(緑)2周波受信機。

号を常に位置測定用アンテナより受信強度の高い状態で追尾できており、仰角-3.2度で一旦途切れたものの、仰角-4.5度程度までは有効に信号を受信できた。このとき、GPS衛星からの信号が地上に最も近くなる近地点は、航空機から南南東に数百km先でその高度は約560mに相当している。

3.3 速度計測システムの評価

速度計測システムの計測原理としては、キネマチックGPS測位は他の測位システムに比べて距離が離れても精度が良いものの、数cmのランダムな位置誤差を有する。もし、それを速度に変換した場合においても、数cm/sの誤差を生むことになる。ところが、IMUデータは、長時間経った場合においてセンサーのドリフトやバイアスによって大きな数km/h(数十cm/s)の誤差を生むが、短時間的な動きを正確に計測することが出来る。この2つのセンサーの特徴を活かし、キネマチックGPS測位によって得られた位置と、IMUデータの加速度と角速度を、オフラインで結合することによって高精度の速度を与えることが可能となる。

航空機の前速度計測の検証は、非常に難しく他に基準になる方法がないので、ここでは次の方法で推定した。図-2はH16年10月20日午前中の実験における、エンジンは動いているが航空機としては静止時のIMUデータの南北・東西速度、キネマデータから出した南北・東西速度とカルマンフィルタを用いて推定した南北・東西速度を表示している。キネマデータの標準偏差は約20 mm/sと大きいためIMUデータ、推定値との重複表示を避けるために上にオフセットして表示してあり、右軸に単位表示してある。また、IMUデータは時間とともにドリフトしていることが分かる。推定値は0mm/s近辺で安定しており、その標準偏差は4mm/s以下である。図-3にそのうちの50秒間を拡大した東西速度に関するIMUデータと推定値の差およびキネマデータと推定値の差を表示する。短期的には推定値はIMUデータに連動しているものの、長期的にはIMUデータのドリフトの影響は排除されていて、当初の設計通りの動作となった。図-4は、同じくH16年10月20日午前中の実験におけ

る、水平飛行時における東西速度に関する50秒間のIMUデータと推定値の差およびキネマデータと推定値の差を表示する。これらのデータは、静止時のデータと同様に、短期的には推定値はIMUデータに連動しているものの、長期的にはIMUデータのドリフトの影響は排除されていて、当初の設計通りの動作となり、静止時

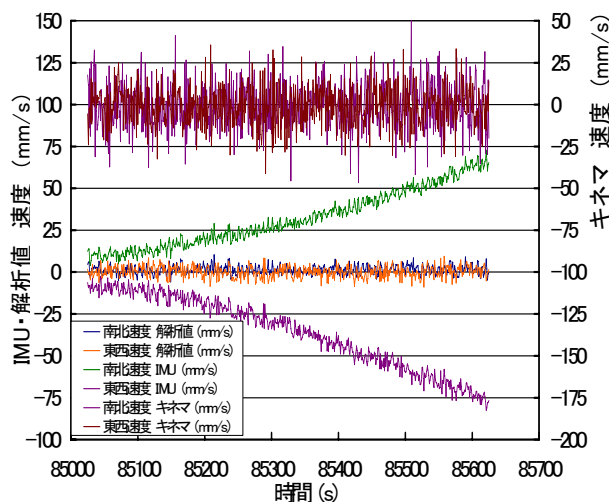


図-2 静止時のIMUデータの南北・東西速度、キネマチックGPSから算出した南北・東西速度、と推定した南北・東西速度

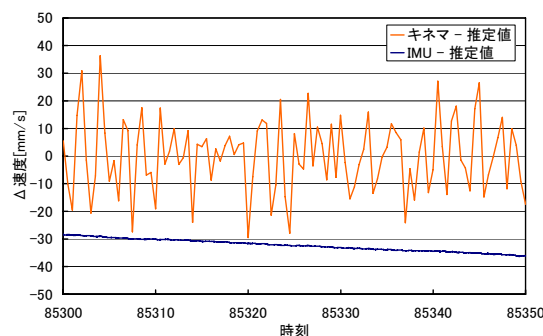


図-3 静止時の50秒間にわたる東西速度に関するIMUおよびキネマチックGPSによる速度とカルマンフィルタによる推定値の差

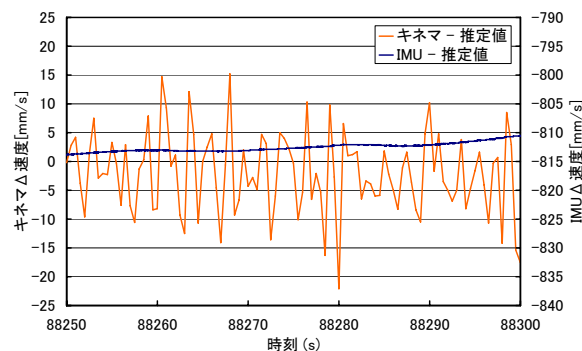


図-4 飛行中の50秒間にわたる東西速度に関するIMUおよびキネマチックGPSによる速度とカルマンフィルタによる推定値の差

における性能を維持できていると考えられる。

3. 4 航空機からのDL掩蔽観測技術の評価

図-5に秋期の2004年10月20日において札幌丘珠空港をベースにした北海道における飛行実験で観測したドップラシフト量と仰角の関係を示す。また、夏期の2004年7月1日午前由高知空港をベースにした四国沖における飛行実験における飛行実験結果は3.2章の図-1に示した。いずれも、掩蔽GPS衛星信号の搬送波ドップラシフト量から掩蔽GPS衛星および実験機の移動によるドップラシフト量を補正したものである。図-1の実験は梅雨期に実施されたものであり、GPS信号の伝搬経路上に弱い梅雨前線が停滞していたことから信号伝搬経路は大きく曲げられ、大きなドップラシフト量が観測された。一方、図-5は乾燥期に実施されていることから、信号伝搬経路がそれほど大きく曲がっておらず、仰角-3度程度までしかGPS信号を追尾できなかった。これらの違いは湿潤大気と乾燥大気

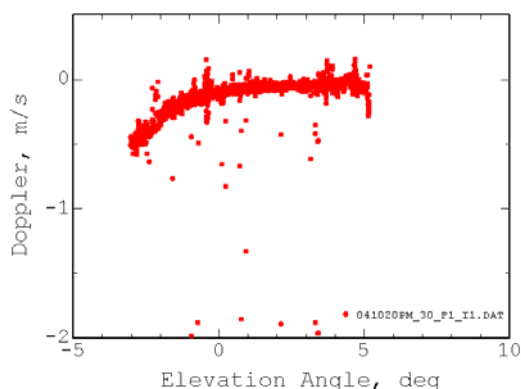


図-5 2004年10月20日の北海道における飛行実験におけるGPSドプラー周波数と仰角の関係

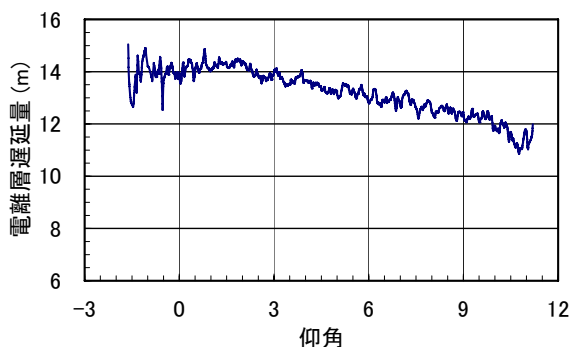


図-6 2004年7月1日のGPS掩蔽観測飛行実験で得た仰角と電離層遅延量の関係

電波伝搬特性の違いを示している。

2004年7月1日午前の高知から宮崎沖に向かう飛行実験において観測した仰角と電離圏による遅延量の間を関係を図-6に示す。このデータは掩蔽データに対する電離圏による影響のモデル化のための通信情報研究機構などに送られた。また、同データを航空機速度および姿勢で補正し、さらに電離圏の影響を除去されたデータを航空機の位置データとともに京都大学生存圏研究所に送付した。生存圏研究所において水蒸気屈折率高度プロファイルを推定した。

4. まとめ

本研究において、当初の目的どおり航空機からのDL-GPS掩蔽観測に必要な航空機搭載システムの技術開発を行うとともに、実際の航空機を使用して航空機からのDL-GPS掩蔽観測の実証実験を成功させた。新規に開発した俯角も含む低仰角から到来する微弱なGPS信号を受信する航空機用DL-GPS受信機は、2系統同時処理可能な受信機として開発されており、航空機に横向きに取り付けられた掩蔽観測用アンテナとの組合せにより、飛行高度約6kmにおいて俯角4.5度までGPS信号を追尾した。掩蔽観測に必要な航空機速度を4mm/s以下の精度で計測できる航空機高精度位置速度計測システムも開発し、航空機の位置と速度の影響を受信信号から除いた。さらに、延べ130時間にわたる飛行実験を実施し、さまざまな地域と季節に対応した実験データを収集することにより、航空機からのDL-GPS掩蔽観測技術の実証実験を、京都大学、情報通信研究機構および気象研究所などの協力によって成功させた。

参考文献

- [1] 吉原貴之, 藤井直樹, 齊藤真二, 星野尾一明, 松永 圭左: 「航空機からのGPS掩蔽観測技術の開発」, 電子航法研究所, 平成16年度(第4回)電子航法研究所研究発表会, 2004年6月
- [2] T. Yoshihara, N. Fujii, K. Hoshino, K. Matsunaga, S. Saitoh, T. Sakai, T. Tsuda, Y. Aoyama and S. Danno: 「Airborne GPS Down-Looking Occultation Experiments」, Long Beach, CA, US, ION/GNSS, 2004 Sep.