

2. 光ファイバ接続型受動監視システム (OCTPASS) 信号処理装置の試作・評価

通信・航法・監視領域 ※角張 泰之, 二瓶 子朗, 宮崎 裕己, 上田 栄輔
機上等技術領域 古賀 禎

1. はじめに

近年の航空交通需要の増加に伴い、大規模空港の空港面では高密度運航が強いられているが、このような状況においても常に安全且つ円滑な地上走行の確保が必要とされている。夜間や悪天候などの低視程時においても確実な航空機監視を実現するため、新しい空港面管制支援システムの一部として、マルチラレーション監視システムの導入が進められている。

マルチラレーション監視とは、航空機に搭載されたトランスポンダから送信されるモード S スキッタ信号を利用した受動型監視手法である。モード S スキッタとは、SSR (Secondary Surveillance Rader)モード S 応答信号形式を使用した、周期的な自発信号である。空港面に設置された3局以上の受信局でモード S スキッタを検出し、その受信時刻差から得られる各受信局と航空機との距離差を元に航空機位置を算出する。

電子航法研究所では、東京国際空港や成田国際空港などの大規模空港へのマルチラレーションの導入に際し、その性能や信頼性に対する事前評価を実施してきた[1]。これらの評価の中で、特に建物が密集するエプロン・スポットエリアに関して、位置精度が悪くなる事象が確認され、マルチパス波による信号干渉が精度劣化原因のひとつとして指摘されている。

このような、マルチパスが発生しやすいエプロン・スポットエリア等におけるマルチラレーションの高性能化を目指し、当研究所ではこれまでに、光ファイバ接続

型受動監視システム以下、OCTPASS と称する)を提案し、それを実現する信号処理手法等に関する検討を進めてきた[2]。

本稿では、OCTPASS の具現化を目指す上でシステムの中心的な役割を担う「信号処理装置」の試作と基礎評価について報告する。

2. OCTPASS の概要

本節では、OCTPASS の全体構成とその特長について、既存のマルチラレーションシステムで一般的に用いられている構成との比較を通して説明する。

OCTPASS の測位原理は、航空機から送信されたモード S スキッタを3局以上の受信局で受信し、その受信時刻差(Time Difference Of Arrival: TDOA)を利用して航空機の位置を算出

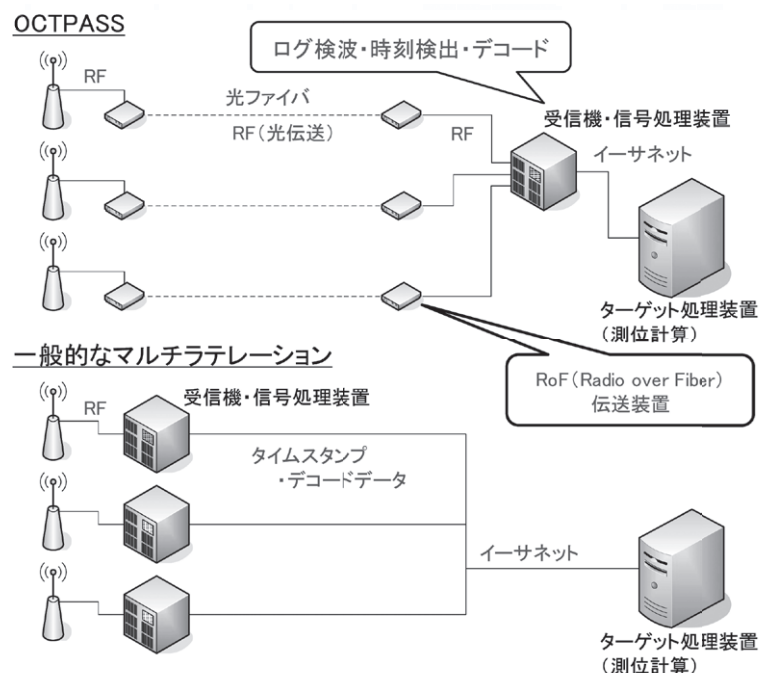


図1. OCTPASS と一般的なマルチラレーションの構成

するものである。電波の送受信方向が逆ではあるが、GPS(Global Positioning System)と同様の計算式を利用することができる。空港面では2次元測位で不都合ない場合も多く、この場合空港面を単純な平面に近似し、最低3局において時刻検出をすればよい。

OCTPASS と一般的なマルチラテレーション測位との最も大きな違いは、検波・信号処理（信号検出、及び信号到達時刻検出）を行うタイミングの違いである。図1. に OCTPASS と一般的なマルチラテレーションの構成を示す。現在広く一般に用いられている方式では、個々の受信局において受信した信号を検波し、信号処理を行っている。ここで得られた検出時刻（タイムスタンプ）と航空機の識別情報を含んだデコードデータとをイーサネットを通してターゲット処理部に伝送し、集約したデータを基に測位計算を行う。

これに対して、OCTPASS では、受信局で受信した RF 信号をそのまま1箇所に集め、検波・信号処理を行うという手法をとる。RF 信号を減衰劣化させることなく受信機まで集めるために、アナログ RF 信号光伝送装置(Radio over Fiber: RoF)を利用し、光ファイバケーブルを通して信号を伝送する。この特徴がもたらす利点として、主に次の2点が挙げられる。

ひとつは、受信した信号が必ずしもデコードできなくとも、測位計算に利用することが出来るということである。空港面では、信号強度は十分にあるがマルチパス等の干渉によりデータビット部が潰れて解読出来ないような状況が存在する。一部の受信局で受信した信号がデコード出来ず、航空機識別情報が解読出来なかった場合においても、OCTPASS では受信した RF 信号は1箇所に集められるため、その信号間の時間的な相関を得ることで、同一航空機から送信された信号であることを判断することが可能である。

利点のもうひとつは、受信局の構成を簡易にできることである。受信局では、複雑な処理を行う信号処理部を持たず、受信した信号を光に変換して伝送する機能だけでよいため、主にアンテナと RoF 送信機のみで構成でき、小型・軽量なものとなる。受信局は空港内の複数地点に

設置されるものであるが、小型化できることによって、そのレイアウトに関してフレキシブルな設計が可能になると考えられる。

3. OCTPASS 信号処理装置の概要

3.1. 信号処理装置の構成

上述の特長をもつ OCTPASS の開発・実用化を目指し、その第一段階として、システムの中心的な役割を果たす「信号処理装置」の試作を行った。OCTPASS に関するこれまでの基礎研究では、受信した信号波形をデジタルストレージオシロスコープで取得し、その信号処理・測位計算を後処理にて実施し、OCTPASS の有用性について検証したものであった。本試作装置は、このような信号処理過程をリアルタイムに実施するものである。

一般的なマルチラテレーションでは、信号処理部は各受信局内にひとつずつ配置されるため、単一入力チャンネルでよいが、OCTPASS では RF 信号を1箇所に集めて信号処理を行うため、複数の入力チャンネルが必要である。

信号処理装置の担う役割としては、大別して、信号検出、時刻検出、データデコードの3つの処理がある。図2. は試作した信号処理装置の概略を示すブロック図である。本装置への入力信号は、ログ検波されたモード S スキッタのビデオ信号であり、A/D 変換された後、適当な多段デジタルフィルタを通り、メモリバッファに入る。信号処理は全て FPGA (Field Programmable Gate Array) 上で行われる。信号検出部によってモード S スキッタを検出すると、これが時刻検出部、データデコード部へのトリガとなり、その結果、信号検出時刻とデータ列とが得られる。これらを PC 上でターゲットレポートとして成型し、LAN に出力する。この装置の試作に当たり、次の機能仕様を定めた。

- 入力チャンネル数： 4 ch
- サンプリング周波数： 200 MHz
- A/D 変換量子化ビット： 16 bit
- 処理能力： 平均 500 応答/秒

以下、今回試作した信号処理装置各部の機能について述べる。

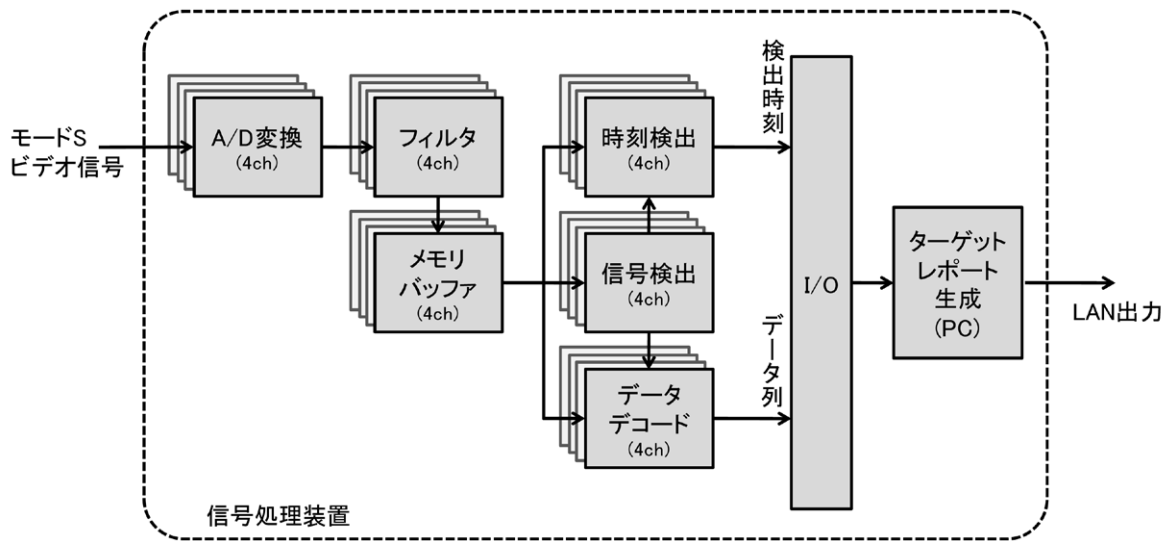


図 2. OCTPASS 信号処理装置の機能ブロック図

3.2. 信号検出部

信号検出部は、入力された信号が、有効なモード S スキッタ波形であるときに、それを検出することを目的とする。モード S スキッタは、図 3. に示すように、4 つのパルス列からなる 8 μs のプリアンブル部と、パルス位置変調(PPM)による 56 μs 若しくは 112 μs のデータブロック部から構成される。モード S スキッタの検出は、このプリアンブル部を検出することによって行われる。

ADS-B (Automatic Dependent Surveillance-Broadcast, 放送型自動位置情報伝送・監視機能)におけるモード S スキッタの検出とデータデコードの手法・要件については、米国 RTCA による最小運用性能要件 (Minimum Operational Performance Standards: MOPS)[3] の中で Enhanced Reception Techniques として、従来より高性能な検出・デコード方式が定義されている。本試作装置においても、上記 MOPS に準拠したプリアンブル検出手法を取り入れている。

プリアンブルの 4 パルス列に対して、規定タイミング(0, 1, 3.5, 4.5 μs) $\pm 0.05 \mu\text{s}$ 以内に立ち上がりエッジがあり (図の下矢印部分)、そのパルスのレベルが規定レベル (Minimum Triggering Level: MTL (設定可変)) 以上であることにより、そのパルスを有効とし、有効パルスが規定個数以上存在した場合、その信号をモード S スキッタと判定する。MOPS では、サンプリング周波数は 10 MHz となっているが、本試作装置では

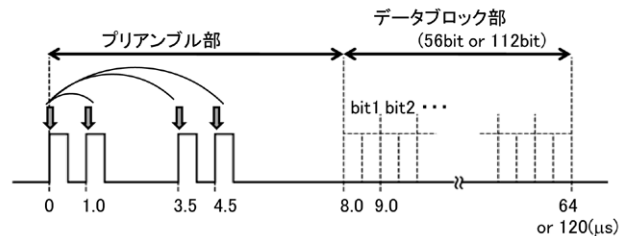


図 3. モード S スキッタの信号形式

次に述べる時刻検出部で高精度検出を行うための手法として、これを 200 MHz サンプリングに拡張している。

3.3. 時刻検出部

時刻検出部は、モード S スキッタの最初のパルスの到達時刻を精度よく検出することを目的とする。信号検出部にて有効なモード S スキッタとして判定された信号の最初のパルスに対して、DAC (Delay Attenuate and Compare, 遅延・減衰比較)方式と呼ばれる時刻検出手法を実施する。DAC 方式は図 4. に示すように、入力信号の遅延波形と減衰波形とを比較し、その交点を時刻検出点とする方法である。この方式では、

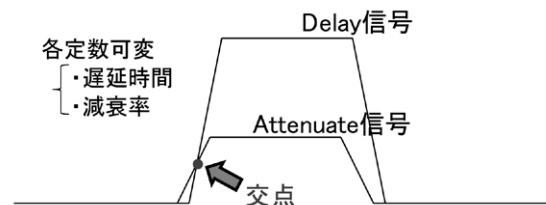


図 4. DAC 方式による時刻検出

信号の立ち上がりエッジ部分で必ず時刻検出がなされるため、マルチパス波などにより信号レベルに影響が出るような場合でも、高精度に時刻検出が可能とされる。

本装置は信号処理を 200 MHz サンプリングで実施しているため、内部のタイムカウンタは 5 ns 間隔で時刻を表現している。DAC 方式では、交点の付近で立ち上がりエッジを直線近似し、1 次連立方程式を解くことで、サンプリング間隔以下の精度で時刻検出することが可能である。

3.4. データビットデコード部

データビットデコード部は、モード S スキッタの 56 bit 若しくは 112 bit のデータビット列の解読とその各ビットに対する信頼性値の提供が主な役割である。デコード部に関しては、サンプリングデータを 10 MHz までダウンサンプルし、それを元に処理を行う。本装置では、前述の RTCA の MOPS (DO-260B) に記載されている、Multi-Sample Technique With Full Table Lookup という方法を利用する。この方法は、1 ビット分 (1 μ s) の中にある、10 サンプルポイントの配列パターンに対して、ビット判定値、信頼性値を予めテーブルデータとして準備しておき、そのテーブルに従ってデコードを行うものである。本方式は、パルス中心点 2 点の上下の関係からビット判定する従来方式に比べて、信頼性の高いデコードが可能である(図 5.参照)。

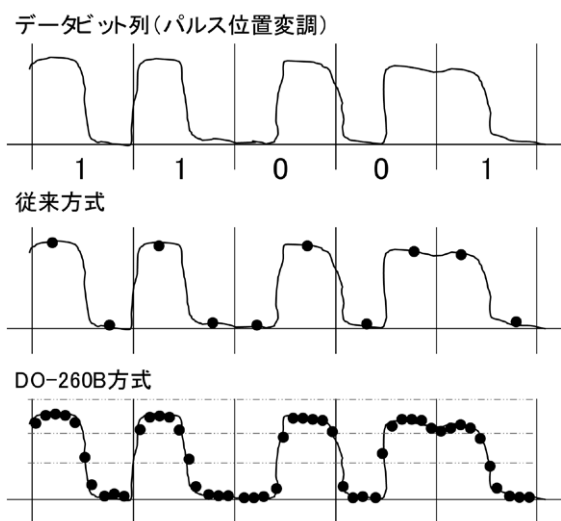


図 5. Multi-Sample Technique によるデコード

3.5. ターゲットレポート出力部

ターゲットレポート出力部は、これまでの信号処理で得られたターゲット情報をレポートのフォーマットに成型し、LAN にて外部に出力する役割を持つ。本処理は、FPGA 上ではなく、パーソナルコンピュータの CPU を用いて行なわれる。毎秒最大 500 ターゲットの出力を可能にするため、10 ms 毎に 5 ターゲットずつをまとめて、UDP パケットとして送出する能力をもつ。但し、ターゲットが検出されない時間はパケットの送出は行わない。

3.6. A/D 出力レコードモード

試験・評価時に受信したモード S スキッタの信号波形を確認するツールとして、A/D 変換後の生のデータを記録するレコードモードを準備している。信号の最初の立ち上がりエッジの検出をトリガにして、 2^{16} 個のデータを 4 ch 分、一括で記録することが可能である。

4. 機能の動作検証

4.1. 動作検証の概要

試作した信号処理装置の持つ、機能の動作検証を行うため、実験室において理想的なモード S ビデオ信号波形を装置に入力し、その動作確認を行った。理想信号波形の生成には、任意波形発生器(Tektronix AFG-3102)を使用した。本発生器は、2ch 独立に信号を出力することが出来、またチャンネル間の遅延時間を ns レベルで調節できるものである。生成波形の確認には、デジタルオシロスコープ (Tektronix TDS-5104) を使用した。

4.2. 信号検出動作の検証

信号処理装置に 2ch 分の信号波形を入力し、その信号検出動作の検証を行った。この時、発生器から出力する信号の強度を各チャンネル 700mVp-p とし、信号の繰り返し入力周期を 2s ~ 1ms の間で段階的に変化させた。延べ 4150 回の信号入力を行ったところ、その全ての信号を検出し、LAN にターゲットレポートを出力することを確認した。レポートの出力タイミングは 10ms 毎、最大 5 ターゲットであるため、恒常的な 1ms 周期の繰り返し入力では、レポート

出力に遅延が生じてしまうが、本結果によれば、機能仕様で定めた 500 応答/秒の処理を十分実現可能である。

4.3. 時刻検出動作の検証

時刻検出動作の検証をするため、信号処理装置に 2 ch 分の信号を任意波形発生器より入力した。入力する 2 つの信号には、発生器の機能により時間遅延を設定し、処理装置での検出時刻差を評価した。時刻の検出誤差はそのまま測位誤差に直結するため、時刻検出は信号処理装置の中でも、特に重要な役割を担う部分である。

時刻検出部の機能として、大きく分けて 2 つの時刻を出力することが出来る。ひとつは、モード S スキッタの最初の立ち上がりエッジがある閾値を超えたときの時刻（プリアンプエッジ時刻と称する）。もうひとつは、DAC 方式によって得られる時刻（DAC 時刻と称する）である。プリアンプエッジ時刻は装置内のタイムカウンタに合わせて得られるため、その分解能は 5 ns である。対して、DAC による時刻検出では、計算により 5 ns 以下の分解能が得られる。

入力する 2 信号の強度を各々 700mVp-p とし、チャンネル間の入力遅延時間を、2.7, 10.5, 22.3 ns（オシロスコープ測定値）と変化させた。その時のチャンネル間の検出時刻差を図 6. 示す。縦軸はチャンネル間の検出時刻差を示している。横軸は入力した信号に便宜的に付した連番である。

青色のプロットは、プリアンプエッジ時刻の差であり、常に 5 ns の誤差の中で離散的に前後することが分かる。それに対して赤色でプロットされた DAC 時刻の差は、1~2 ns の範囲で収まっており、またその平均値は実際の値と非常に近い値を示すことが分かる。

5. 仙台空港における基礎評価

5.1. 評価の概要

OCTPASS の基礎評価試験として、測位ターゲットとしてのモード S トランスポンダを搭載した実験用車両を用い、仙台空港内において測位実験を実施した。

受信局は、仙台空港の B 滑走路東端及びターミナルビルエプロン付近を取り囲むように、3 局設置した。受信局 1 は対空通信鉄塔の上、高さ約 12m に、受信局 2 は地面から約 6 m の高さのマストを立て、それぞれアンテナを設置した。受信局 3 は当研究所の測定用バスの上に高さ約 10 m のポールを伸ばしてアンテナを設置し、このバス内に受信機（検波器）、信号処理装置、評価用 PC などの主要機材を配置した。受信局 1, 2 からバスまでは光ファイバケーブルを用いて受信した RF 信号を伝送し、受信局 3 については光伝送を介さずに受信信号を接続した。

使用したトランスポンダは、1 秒に 1 回、1090MHz のモード S スキッタを送信し、送信電力は 200W である。

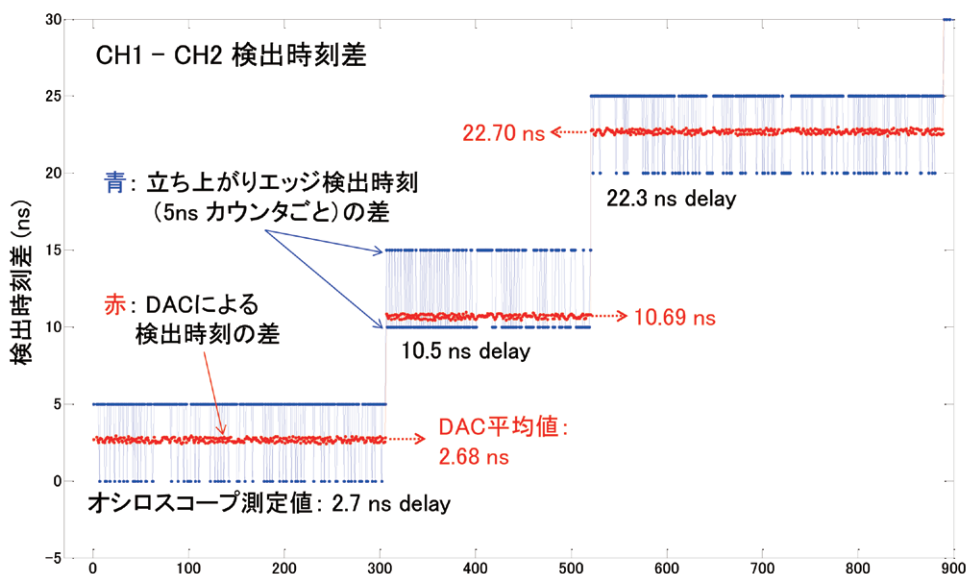


図 6. 入力チャンネル間における DAC 方式による検出時刻の差

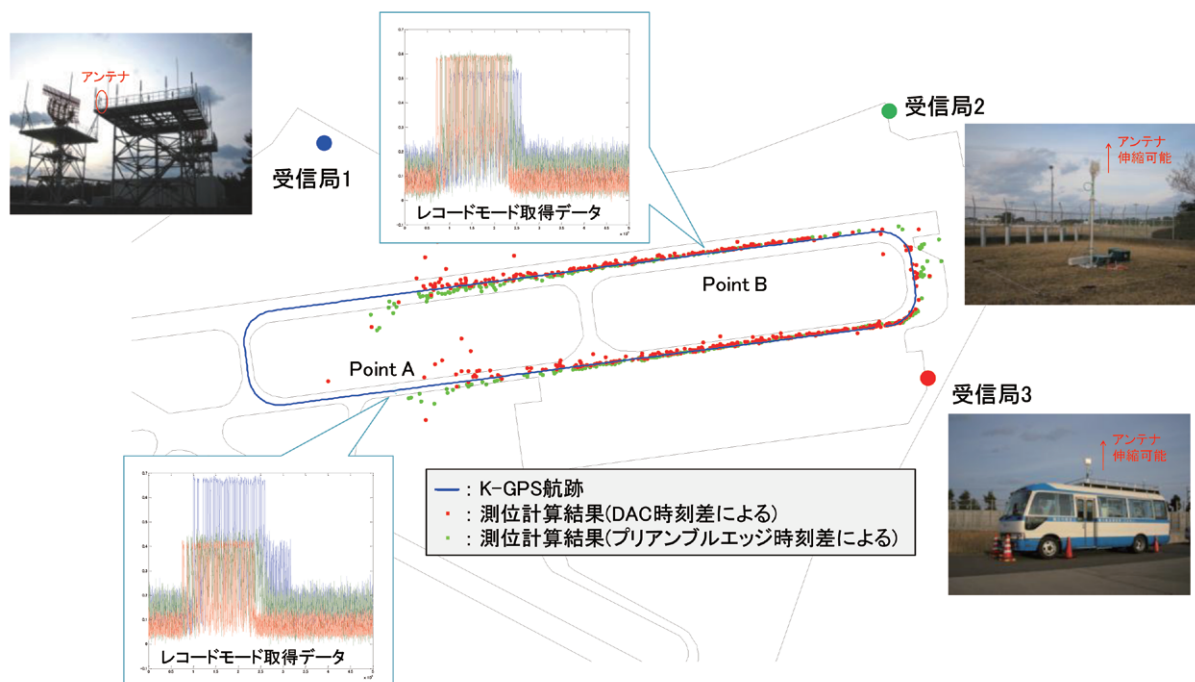


図7. 車両走行評価における測位航跡例

5.2. 車両走行評価の結果

仙台空港 B 滑走路東端付近を周回するコースにおいて、実験車両による走行試験を行った。信号処理装置において検出した DAC 時刻及びプリアンブルエッジ時刻を使用してそれぞれ測位計算した航跡例を図 7. に示す。実線は比較対象の GPS 航跡である。3 局で囲まれた中心付近に寄るほど安定し、両端に行くほど航跡の乱れや抜けが目立つ。これらの原因として、両端付近では、受信局との位置関係から測位計算解に誤差が生じやすいこと、また、反対側の受信局との物理的な距離により信号の未検出が発生することが考えられる。

測位結果が対照的な図中の Point A 地点、Point B 地点に着目し、両地点での受信信号のログ検波波形を図中に併記した。Point B では各受信局間の信号レベルがほぼ等しく、Point A では信号レベルが大きく異なる。今回の実験では、受信した RF 信号をそのまま伝送する光伝送系において全体的にノイズが大きく、信号を検出するトリガレベルを高めに設定した。そのため、Point A より左側においては受信局 2、3 の信号を検出できなかったものと考えられる。尚、Point B の付近でも信号の検出に一部抜けが生じており、これも RF 伝送段階でのノイズが影響したものと考えられる。

6. まとめ

OCTPASS の開発にむけて、試作した信号処理装置とその基礎評価の結果について報告した。

今回の仙台空港における基礎評価の結果を踏まえて、実環境下での安定な動作を実現するために必要となる、信号処理装置の各部設定パラメータの更なる調整や、高性能な光伝送系の確保等を図り、OCTPASS の特長を生かしたシステム開発を進める予定である。

謝辞

評価試験を行うにあたり多大なご協力を頂きました国土交通省 東京航空局 仙台空港事務所の関係各位に感謝致します。

参考文献

- 宮崎 他, “マルチラテレーション管制機器化評価委託”, 電子航法研究所受託研究報告書 (2009)
- 田嶋 他, “空港面受動測位におけるマルチパス誤差低減時間検出手法”, 電子航法研究所報告, **121**, p19 (2009)
- Radio Technical Commission for Aeronautics, “Minimum Operational Performance Standards for 1090 MHz Extended Squitter ADS-B and TIS-B,” RTCA DO-260B (2009)