

10. マルチスタティックレーダによる航空機監視

～DTTB～

監視通信領域 ※本田 純一, 大津山 卓哉, 渡邊 優人

1 まえがき

近年の航空管制用の監視システムは、航空機に搭載されたトランスポンダに頼った二次監視レーダ（SSR）及びその応用技術（MLAT, WAM, ADS-B）が主流となっている。しかし、トランスポンダが未搭載もしくは予期しない動作（停波状態等）となる場合には、SSR系では監視不能となる問題も抱えている。そのため、古典的な電波の反射を利用した一次監視レーダ（PSR）は安全運航の観点からも重要な役割を果たしているといえる。しかし、SSR と比べ PSR の検出率は劣っており、また更新頻度も低い。以上のことから、現行 PSR に代わるマルチスタティックレーダ（MSPSR: Multi-Static PSR）が注目されている[1][2][3]。

当研究所では、MSPSR への活用を目指して、複数の監視技術の研究を進めている[4][5]。本稿では、MSPSR コア技術の一つとして開発を進めている地上デジタル放送波（DTTB: Digital Terrestrial Television Broadcast）を用いた航空機監視システムの概要と実験で得られた成果を紹介する。実験結果から DTTB による航空機の検出が可能であるということが示される。

2 MSPSR の目的信号

図 1 に MSPSR のイメージ図を示す。図中に示すように、MSPSR では航空用の電波だけでなく、DTTB 等の他の信号も利用した監視システムの実現が期待されている。本節では DTTB を始め MSPSR で利用が期待されている目的信号とその特徴について述べ、当研究所にて DTTB を採用した目的について簡単に説明する。

2.1 目的信号の種類

MSPSR は PBR の組み合わせからなる監視システムである。MSPSR の目的は、平成 30 年電子航法研究所研究発表会の「9. マルチスタ



図 1 MSPSR のイメージ図

ティックレーダによる航空機監視～OFC-PPSR～」にて説明しているので、本稿では省略する。上記発表で記したように、MSPSR では複数の信号の利用が考えられる。表 1 は、MSPSR への応用が期待される信号について、対象とする監視覆域をまとめたものである[6]。なお、空欄は調査中の項目となる。

表 1 目的信号の種類と覆域

		対象覆域		
		空港面	ターミナル	航空路
目的信号	GSM	◎		
	DAB/DVB		◎	○
	FM		○	◎
	GNSS			
	L-band		○	
	S-band		○	○

表中に示したように、使用する電波によって監視性能が異なる。これまでの各国の MSPSR に関する研究成果を見ると[6]、各国の使用する電波資源を考慮して、対象とする覆域

やターゲットの種類によって適切な信号を選択することが必要になると思われる。

これらの信号の中でも DTTB（表中では DAB, DVB に相当する）は、MSPSR への応用が期待される信号源である[5]。DTTB は他の信号に比べて常に安定して電波が送信されており、また送信出力が比較的大きいため監視覆域が広く取れると考えられる。さらに、国内で使用される DTTB の周波数帯が約 470MHz～700MHz 帯であることも考えると、航空機サイズとの関係から分解能もある程度確保されると想定される。以上のことから、当研究所でも DTTB に着目した航空機監視システムを考えている。

2.2 DTTB の特徴

国内の DTTB は、変調方式として直交周波数分割多重方式 (OFDM) を採用した ISDB-T 方式が取り入れられている[7][8]。構造物からのマルチパスに強く、アナログ放送波で発生していたゴースト等の現象を軽減することができる。ISDB-T の特徴の一つとしてガードインターバルがあげられる。ガードインターバルは、信号の有効シンボルの後半部分の一部とまったく同じ信号を送信波形の先頭に取り付けたものである。これにより送信信号に不要波が侵入したとしても、ガードインターバル内であれば誤り訂正が可能である限り、元の信号を復調できる特徴がある。また信号の相関を取ることで、混信した信号を分離することも可能である[5]。通常、マルチパスは混信の原因となり、放送波の性能を低下する要因として、アンテナの向き等を調整することで避けられるものである。しかし本研究では、これを逆手にとり、マルチパスに対応した遅延信号を積極的に取得して航空機測位に応用する方法を考案した。

遅延信号の取得は DTTB の商用測定器にもオプションとして備えられていることが多く、比較的簡単にデータを取得することができる。遅延信号の推定はいくつか方法があるが、一般的には、信号のスタートタイミングを決定した上で、なるべく多くの遅延信号が入るようにウィンドウサイズを決めた上で FFT をかけることである。当研究所では、MSPSR のコア技

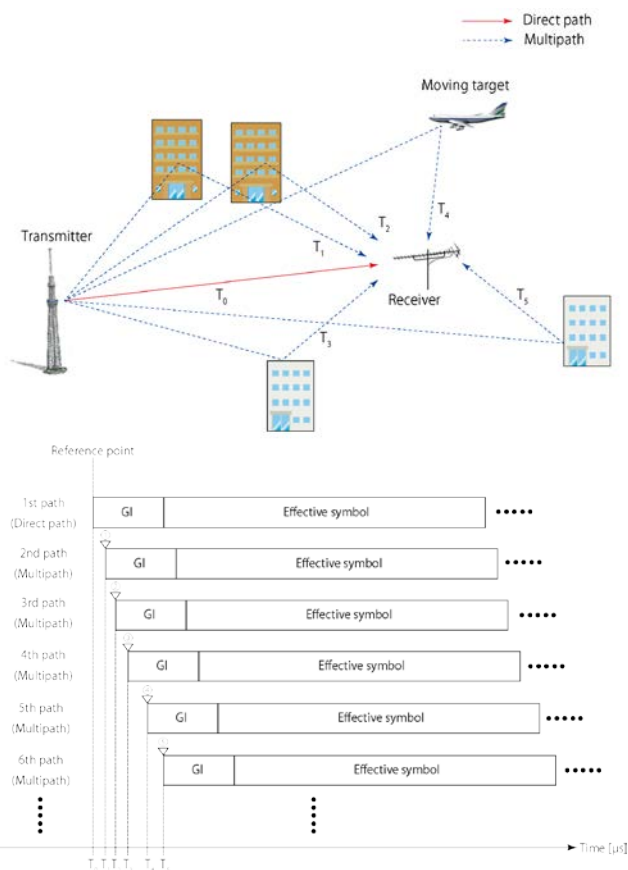


図2 マルチパスと遅延の関係

術の一つを目指して、DTTB の遅延信号を利用した監視システムの開発を目指している。図2は遅延信号の発生のイメージ図となる。送信された信号は、建物や移動体からの複数の反射・回折波が発生した上で受信点に到達する。伝搬距離によって到達時間は異なり(図2下)、それぞれ同じ信号ではあるが、伝搬距離に応じて受信レベルが異なる。

2.3 バイスタティックレンジング

受信機のみで移動体を検出する場合は、PBRの基本原理に基づいて位置推定が行われる。図3は、バイスタティック構成の測位原理図を示したものである。図中では、送信源から受信点までを L_0 、送信源からターゲットを經由して届く散乱波の経路を $\Delta = L_1 + L_2$ としている。 Δ は直接波に比べて伝搬経路が長いいため、距離に応じた遅延が発生する。遅延時間が一定であれば、伝搬距離の差も一定となるため、図に示すように送受信点を取り囲む楕円状にマルチパスの要因となった障害物の位置が決定される。

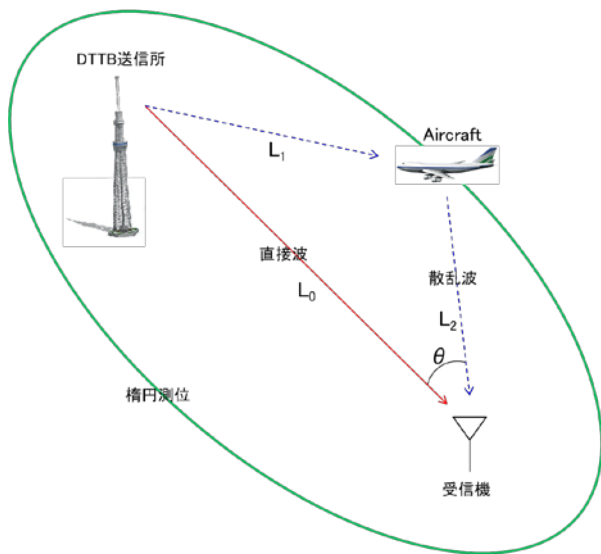


図3 バイスタティックレンジング

3 DTTB 遅延信号による航空機測位

本章では、当研究所が提案する DTTB 遅延信号を用いた航空機測位手法について紹介し、実験結果をいくつか示すこととする。

3.1 位置推定方法

DTTB 遅延信号を用いた航空機測位手法の手順について改めて下記のようにまとめる。

- ① 遅延信号の取得
 - ・ 信号のスタートタイミングの決定
 - ・ FFT により遅延時間算出
- ② バイスタティックレンジング処理
- ③ 位置推定
 - ・ 1 局構成[5]
指向性アンテナと楕円の交点から位置を推定 (精度低)
 - ・ 2 局以上の構成[9]
楕円の交点から位置推定 (1 局構成より精度が高く、受信局が増えれば高さも算出可)

上記手順①で取得される遅延信号は、マルチパス環境下において、図4で示すような遅延プロファイルとなる。横軸は遅延時間を μs で、縦軸は直接波を基準とした相対受信電力を dB で示す。複数のピークが表れているが、これらが建物等からのマルチパスとなり、それぞれの距離差が遅延時間から明らかになる。仮に測定

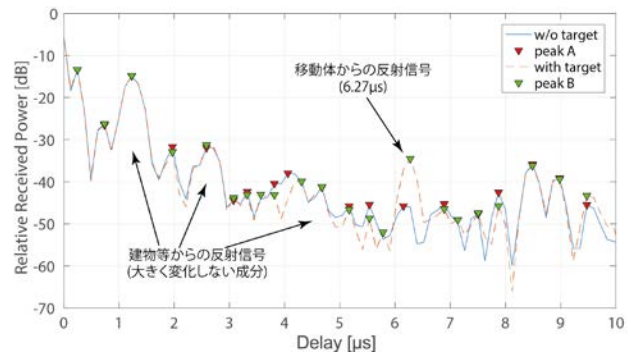


図4 遅延プロファイルの例

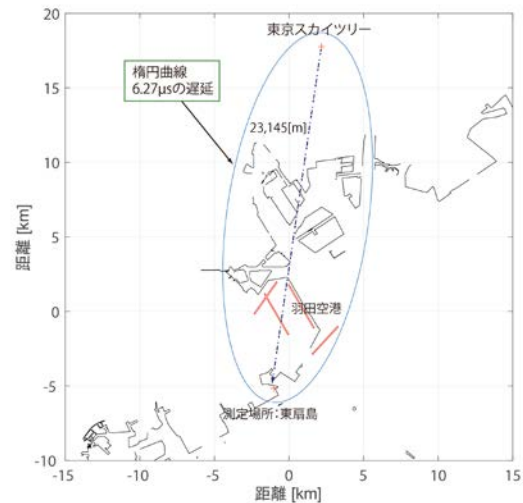


図5 バイスタティック楕円 (6.15 μs)

場所付近に移動物体が存在する場合には、それまでなかった遅延信号が検出される。図では遅延時間が $6.27\mu\text{s}$ となる箇所において、移動体が検出されたときに、これまでより高い受信電力が得られていることが示されている。この結果、測定場所及び送信場所は既知であるため、得られた移動体からの遅延時間に相当したバイスタティック楕円を描くことができる。

図5は図4で移動体が検出された $6.27\mu\text{s}$ に対応したバイスタティック楕円である。なお、図4は羽田空港に近い東扇島で測定した結果である。この時の測定では、送信所は東京スカイツリーとなり、得られた遅延時間から送受信点を取り囲んだ楕円が描かれる。このように提案システムでは、移動体いかなを問わずマルチパス発生地点を楕円上に推定できる。これを1局で行う場合には、先に述べたように指向性アンテナと組み合わせて、指向性方向の直線と楕円の交点から位置を推定し、2局以上で実施する場合には図6に示すように楕円の交点から障害

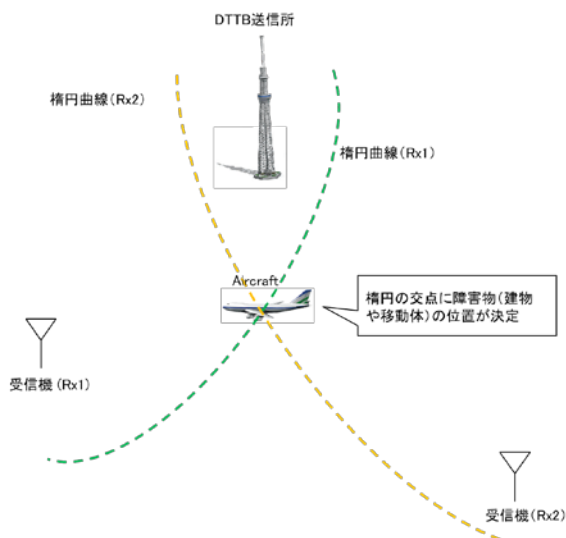


図 6 2局による楕円測位の原理

物の位置を推定できる。

3.2 実験結果 (1局測位)

提案システムの動作検証のため東京湾周辺で実験を行った。図 7 は実験風景の 1 枚である。使用するアンテナは八木アンテナ、もしくは八木アンテナに相当する DTTB 用のアンテナを利用した。遅延時間の取得にはスペクトルアナライザーを用い、PC で制御してデータを収集する構成とした。

1 局の受信機構成にて千葉県袖ヶ浦市の袖ヶ浦海浜公園にて実験を行った。送信局は東京スカイツリーからの電波を利用した。なお、使用した信号は 21ch (518-524MHz) で送信電力は 10kW である。送信所から受信地点までは、直線距離で約 31km となる。図 8 は遅延プロファイルの測定時間中の変化を示したものである。これは、図 4 で示した遅延プロファイルを測定時間に合わせて並べて表現するようにしたものである。移動体が検出されれば、移動体の場所に応じた遅延時間の動きが見える。横軸は測定時間、縦軸は遅延時間 (図 4 の横軸にあたる)、色の濃淡は信号強度を示す。図中から 3 μ s 程度までの短い遅延時間を除けば、14 μ s 付近に強い遅延波が見られる。また、15 μ s~25 μ s 付近にかけて移動体からの 3 本の曲線となって表れている遅延波が捉えられている。このように DTTB 遅延信号を用いることによって移動体が検出できることが分かった。なお、これらの遅

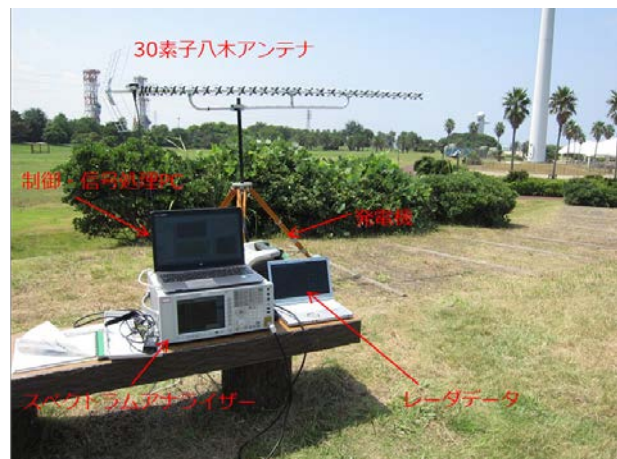


図 7 実験風景

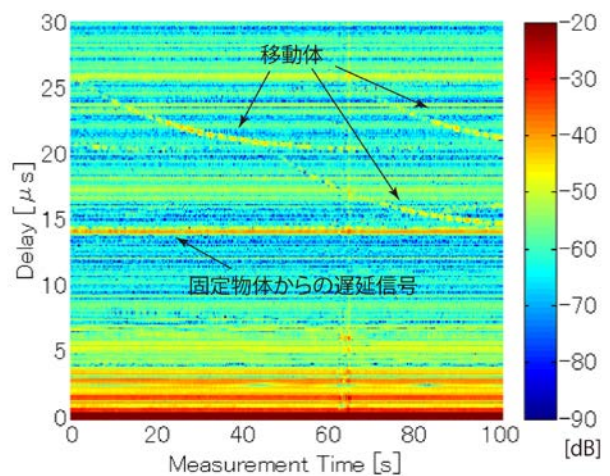


図 8 遅延プロファイルの時間経過

延時間を元に障害物 (建物および移動体) の位置推定が可能となる。

図 9 にバイスタティック楕円を示す。代表として 10 μ s, 14 μ s (図 8 で示された特徴的な遅延), 20 μ s を描いた。14 μ s に注目すると受信アンテナ方向に高速のパーキングエリアである“海ほたる”が存在する。袖ヶ浦における測定では、ちょうど 14 μ s の遅延時間となる場所に当該建造物が存在し、そのポイントは完全に一致する。よって、概ね精度も良いと判断できる。次に 15 μ s~25 μ s の結果を確認する。図 10 は当該遅延時間に対応したバイスタティック楕円と推定された移動体の位置を示す。なお移動体の位置は、楕円とアンテナの指向性方向から決定される。推定された移動体の位置は、羽田空港への着陸経路上に位置しており、着陸する航空機を捉えたものであると判断できる。なお本稿ではページ数の関係から省略するが、ADS-B

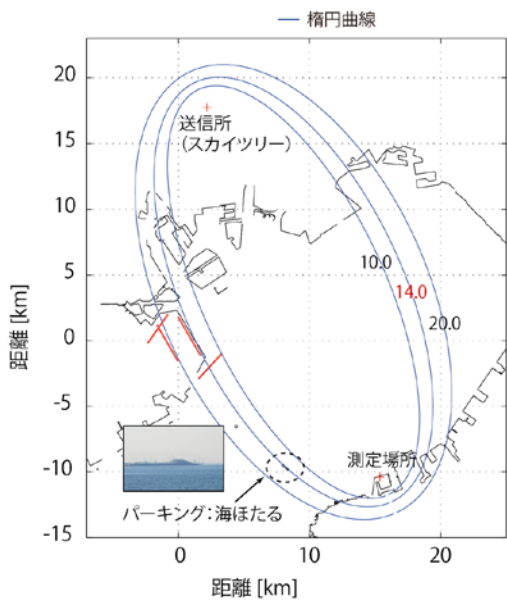


図9 バイスタティック楕円（固定目標）

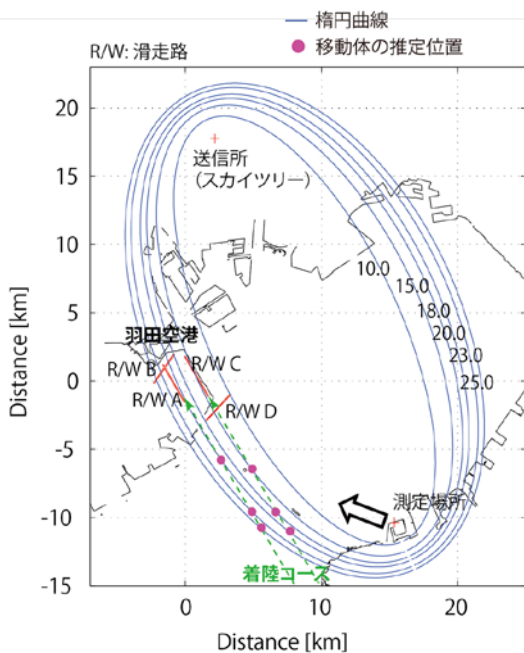


図10 移動体の位置推定（1局測位）

と比較することによって、本システムで捉えた移動体は航空機であることが証明されている[10]。

3.3 実験結果（マルチ測位）

次にマルチスタティック構成への足掛かりとするために、2局構成による実験を実施した。図11は、千葉県木更津市に位置する鳥居崎海浜公園および金田さざなみ公園の2か所で同時時間帯に取得した遅延プロファイルの時間経過を

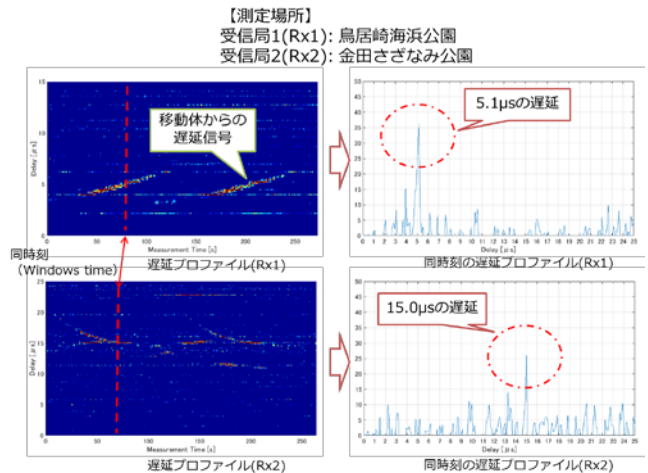


図11 遅延プロファイルの推移（2局構成）

示す。図中左に示すように移動体からの遅延信号が得られていることが分かる。なお、こちらのデータは図8とは異なり信号処理を施した結果である。基本的に移動体からの散乱波については建物等の固定物体からの散乱波に比べて微弱であり、頻繁に不要波に埋もれる傾向にある。そこで、レーダ信号処理でいうところのMTIに相当した信号処理を行い、移動体からの遅延信号のみをより特徴的に捉えるようにした[11]。また、この実験では2局がそれぞれ独立して動作することとなるため、測定前に内部時刻については同期をとった。取得した2局のデータから、実験後に同時刻のデータを抽出した遅延プロファイルが図中右側となる。これらの図から、Rx1では $5.1\mu\text{s}$ 、Rx2では $15.0\mu\text{s}$ に移動体からの遅延信号と思われるデータが得られた。このデータに対応した楕円を用いて移動体の位置を推定する。

図12は楕円測位の結果である。2つの楕円から2つの交点を得られる。しかし、本実験では指向性アンテナを使用しており、その方向は海ほたるとなる。よって、Rx2の後ろ側の交点についてはデータの取得が難しいと考えられる。このことから、予想される移動体の位置は海上の1点に求められる。この点は羽田空港の着陸コース上にちょうど位置しており、得られた結果は航空機からであると推測される。

4. まとめ

本稿は、MSPSRのコア技術の一つとなることが期待されるDTTB遅延信号を用いた新し

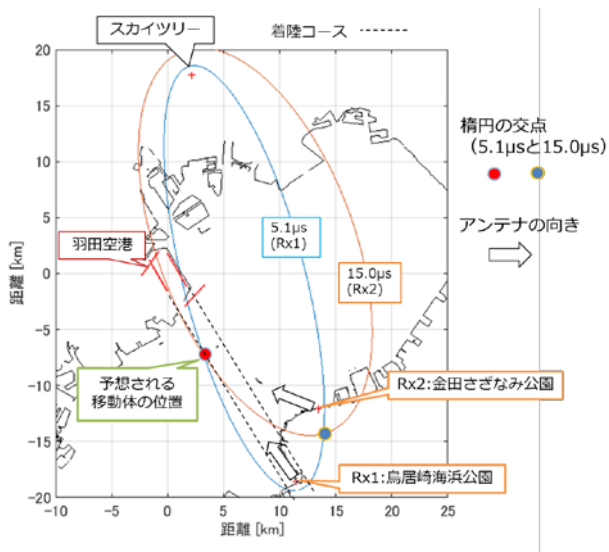


図 12 移動体の位置推定 (2局測位)

い監視技術を紹介した。本システムは電子航法研究所が提案した独自の監視システムである。まず、DTTBの基本的な特徴と障害物(建物、機体等)からのマルチパスに相当した遅延信号の取得方法について説明した。次に遅延時間から推定されるバイスタティック楕円の算出と、この提案技術を用いた1局及びマルチスタティック化を想定した2局構成の実験システムの測定結果を示した。実験から、DTTB遅延信号を用いることで移動体の位置推定が可能であることが明らかになった。

今後は、さらに本システムの性能について検証を進め、システム実用化に向けた開発を進めていきたいと考えている。

参考文献

[1] P. Bezousek and V. Schejbal, "Bistatic and Multistatic Radar Systems," RADIOENGINEERING, vol. 17, no. 3, pp. 53-59, Sept. 2008.

[2] M. Cherniakov, Bistatic Radar: Emerging Technology, England: Wiley, 2008.

[3] S. Marquard, "Suitability of Multi-Static

Surveillance System for Aeronautical Use (Passive Radar)," International Civil Aviation Organization Working Paper, Montreal, WP ASP12-12, March 2012.

[4] J. Honda and T. Otsuyama, "Optical-fiber-connected passive primary surveillance radar for aeronautical surveillance," IEICE Communications Express, vol.7, no.3, pp.65-70, Dec. 2017.

[5] J. Honda and T. Otsuyama, "Feasibility Study on Aircraft Positioning by Using ISDB-T Signal Delay," IEEE Ant. and Wireless Propaga. Letters, vol.15, pp.1787-1790, DOI.10.1109/LAWP. 2016.

[6] T. Otsuyama and S. Marquard, "Status Update on MSPSR Development," International Civil Aviation Organization Working Paper, Montreal, WP ASWG7-WP/12.2, April 2018.

[7] Transmission system for digital terrestrial television broadcasting, ARIB Standard STD-B31 Ver.1.5, Jul. 2005.

[8] M. Takada and M. Saito, "Transmission System for ISDB-T," Proc. the IEEE, vol. 94, no. 1, pp. 251-257, Jan. 2006.

[9] J. Honda, T. Otsuyama, M. Watanabe, and Y. Makita, "Concept of Multi-Static Primary Surveillance Radar using DTTB Signal Delays," Proc. Int. Conf. Radar, Brisbane, Australia, Aug. 2018. (Accepted)

[10] J. Honda and T. Otsuyama, "Coverage Area of Passive Bistatic Radar Using DTTB Signal Delays," Proc. 2017 IEEE Int. Conf. Computational Electromagnetics, pp.362-364, Kumamoto, Japan, March 2017.

[11] 本田, 大津山, "ISDB-T パッシブ測位における固定物体抑圧の実験結果," 映情学技報, vol.40, no.1, BCT2016-15, pp.61-64, Jan. 2016.