

9. マルチスタティックレーダによる航空機監視

～OFC-PPSR～

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）が注目されている[1][2][3]。

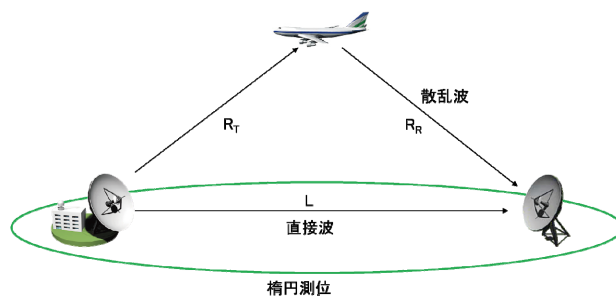
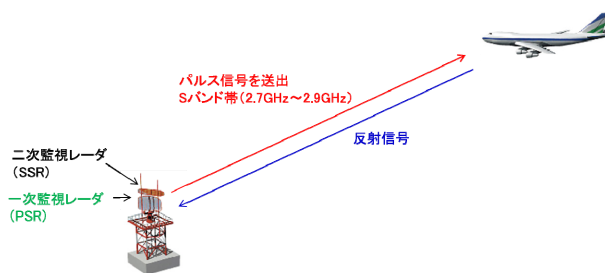
当研究所では，MSPSR への活用を目指して，複数の監視技術の研究を進めている。本稿では，まず MSPSR の果たす役割について説明する。次に，航空用途に割り当てられている周波数資源を有効活用するため，現行 PSR の信号を利用し監視覆域の拡張を図った光ファイバ接続型パッシブ一次レーダ（OFC-PPSR: Optical-Fiber-Connected Passive PSR）の研究成果を紹介する。

2 MSPSR の概要

本章では MSPSR の概要を紹介する。

2.1 MSPSR の役割

PSR は，一般的にもよく知られているように，電波の反射を利用した監視システムである[4]。図 1 に示すように，照射した電波が移動体にあたり，その際発生した反射波を捉えることで移動体の位置を推定する。航空管制に利用される PSR は送受信機一体型となっており，電波の送信時刻に対して，レーダからターゲットまでの電波の往復時間によって移動体の位置が推定される。このとき利用される反射波は移



動体の大きさ，形状，姿勢あるいは送信アンテナのビーム幅等の複数のパラメータによって，検出率が大きく変化する。反射信号は必ずしも送信側（レーダ側）に戻ってくるわけではないため，SSR 等と比べると低い検出率となる。また，現状では回転型のアンテナに頼っているため，その更新頻度は国内のもので 12rpm（4 秒に 1 回）となっており，WAM 等の SSR 応用技術に比べると監視性能は劣る。以上のことから，現行 PSR の監視覆域拡張や更新頻度向上を目指したパッシブバイスタティックレーダ（PBR: Passive Bistatic Radar）の原理に基づいた MSPSR が注目されている[3]。

PBR の基本原理は，PSR と異なり送受信機が分離されていることにある。そのため，移動体の検出は図 2 に示すように，直接波に対して移動体からの反射波成分を含む散乱波の受信時刻差を見ることによって，送受信機を取り囲む楕円状に推定される。PBR の利点は，通常，送信側に戻らない散乱波成分を検出することが

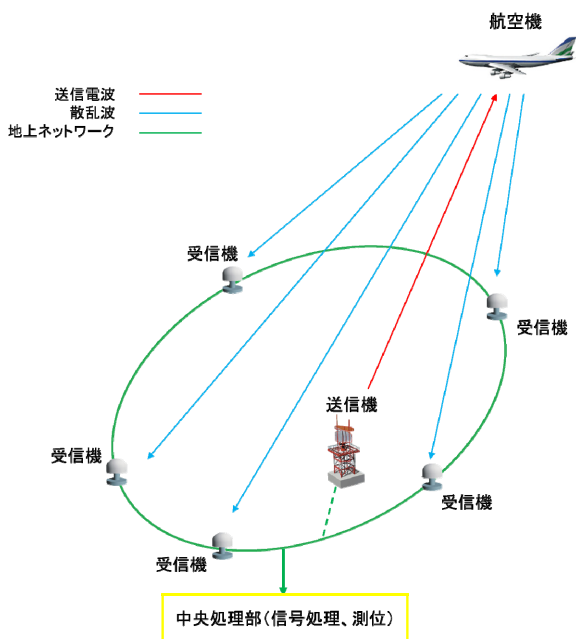


図3 MSPSRのイメージ図

できるため、部分的に監視できないエリアや低高度の航空機等の検出を目的として監視覆域の拡張が期待できる。MSPSRは図3に示すようにPBRの性能を備えた複数の受信機(もしくは複数の送受信機)の組み合わせからなる。複数の地点で移動体からの散乱波を検出することにより、覆域の拡張を図ることができる。

2.2 MSPSRの特徴

前述のようにMSPSRはPBRの組み合わせからなり、通常送信側に戻らない散乱波を捉えることによって移動体の位置を推定する。非常に面白い特徴として、このとき使用される電波は航空用の電波に限らないことである[1][5]。通常、PSRは2.7GHz~2.9GHzのSバンドの周波数帯を利用する。しかし、その他の目的信号、例えば、地上デジタル放送波、AM/FM、移動体通信用基地局(3G/LTE)、GNSSなどの利用も考えられる。これは、近年の周波数資源の逼迫状況を鑑みると、新たに電波資源を取る必要がないため非常に優位な点である。また、うまくシステムを構築できれば、WAMのようなSSRの分散型システムと同様に毎秒更新といった更新頻度の向上も見込まれる。さらには、複数の信号を使った監視システムを構築できれば、シームレス監視という道も開けるだろう。つまり、周波数共用、現行PSRの監視覆域拡

張・補間、更新頻度向上等を考えると、MSPSRの社会に果たす役割は大きいと考えられる。また、ここで得られた技術は、航空機に限らず車両や人検知などへの応用も十分に検討できるものである。

当研究所では、MSPSRを構築するためのコア技術の開発を進めており、本稿ではその一つのアイディアを紹介する。

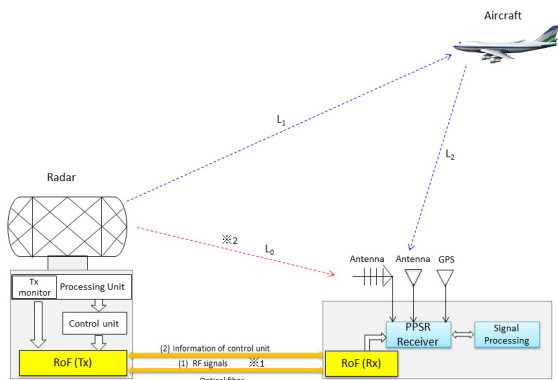
3 OFC-PPSR

本章では、MSPSRのコア技術の一つとして当研究所で独自に開発を進めているOFC-PPSRの概要について記述する[6]。

3.1 システムコンセプト

OFC-PPSRは、現行PSRの信号を有効活用し、既存レーダにおける監視覆域の補間や拡張を目指した電子航法研究所独自の監視システムである。MSPSRの特徴の一つとして、複数の信号が候補に挙がることはすでに述べた通りであるが、あえてPSRの信号を利用するには以下の理由がある。まず、現行PSRの未検出エリアの補間を目標としていることである。次に、いかに他の信号を利用できることが魅力的だとしても、管理できない電波に頼った場合、不具合が生じると現在の運用ではリスクとなることである。以上のことから、当研究所では、周波数資源の効率的な運用の観点からも他の周波数帯に新しく信号を取りに行くのではなく、既存の航空用途で管理されている信号を使ったシステムを検討するに至った。

OFC-PPSRのコンセプトについては以下の通りである。前述したように、PSRは送受信機一体型となっているため、受信機は送信波形や送信タイミング等の送信情報を常に得ることができる。そのため、比較的容易に移動体の検出を行うことが可能である。一方、PBRでは通常送信側の信号が未知となるため、送信信号を参照する機能が必要となり、そのための信号処理の実装が求められる。OFC-PPSRを検討することになったきっかけは、受信機を分離したとしても送信情報を常に安定して得ることができれば、通常のPSRと同等の動作となり、またシステム構成次第では現行システムを補間する



※1 直接波に相当する参照信号
 ※2 直接波、RoFを利用しないときに使用

図4 OFC-PPSRの基本コンセプト

役目を持つだろうといったことが始まりである。そこで通常の PSR と同様に送信信号を得るために、光ファイバ無線 (RoF: Radio over Fiber) 技術を応用した監視システムを検討した。RoF は当所の OCTPASS やミリ波レーダ等の他の研究テーマでも利用されており、RF (高周波数) もしくは IF (中間周波数) 信号を光振幅変調させることによって、光ファイバを用いて信号の長距離伝送を可能とする。

図4は OFC-PPSR の基本コンセプトを示す。図中に示すように、送信機側に RoF 送信機を設置し、局部制御監視装置からの送信タイミング等の情報と送信モニタ波形 (以下、これらを総称して「参照信号」とする) を光ファイバを通して離れた場所に設置した受信機まで伝送する。受信機側では RoF 受信部と散乱波用アンテナで信号を検出し、通常のレーダ同様の処理が可能となる。通常、PBR では受信側に散乱波用のアンテナだけでなく直接波用のアンテナも装備していることが多い。直接波用のアンテナを持つことにより、送信タイミングを把握して信号処理を行う。つまり、空間中を伝搬する直接波信号を正しく受信する仕組みが求められる。一方、提案システムでは RoF を用いて送信信号を直接受信することができる。本機能の利点は、空間中を伝搬する信号を利用することがないため、伝搬中に発生した干渉等を全く受けないことである。結果として高い S/N 比を維持でき、たとえ送受信点が見通し外であったとしても信号処理が可能である。これは通常の PBR ではなしえない仕組みである。直接波用

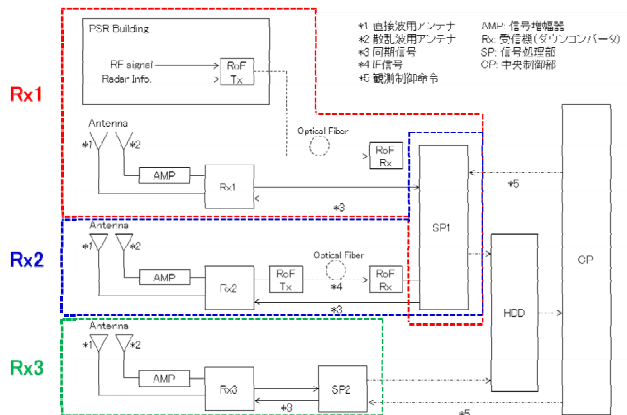


図5 3局体制の実験システムの構成

のアンテナを利用しないため、受信機の簡素化にもつながり、複数の受信機を展開する場合においては、コスト削減にもつながると考えられる。信号処理に係る RoF 使用上の注意点としては、送信機から受信機までの光ファイバ長に依存した信号の遅延時間を補正しなければならないことである。

3.2 実験システムの概要

提案手法に基づいて試作した実験システムを紹介する。図5は受信局を3局体制として試作した実験システムの概要図となる。図中の Rx1 が図4で示した基本コンセプトとなり、Rx2 と Rx3 はマルチスタティック構成を目指した場合の増設受信機で、提案システムの可能性を模索するために製作したものである。簡単ではあるが構成を下記のようにまとめる。

- Rx1
 - ① 受信アンテナ (直接波, 散乱波)
 - ② プリアンプ
 - ③ RoF (RF 伝送用)
 - ④ 受信機
 - ⑤ 信号処理部 1
- Rx2
 - ① 受信アンテナ (直接波, 散乱波)
 - ② プリアンプ
 - ③ RoF (IF 伝送用)
 - ④ 受信機
 - ⑤ 信号処理部 1
- Rx3
 - ① 受信アンテナ (直接波, 散乱波)
 - ② プリアンプ

DC: ダウンコンバータ
SP: 信号処理部

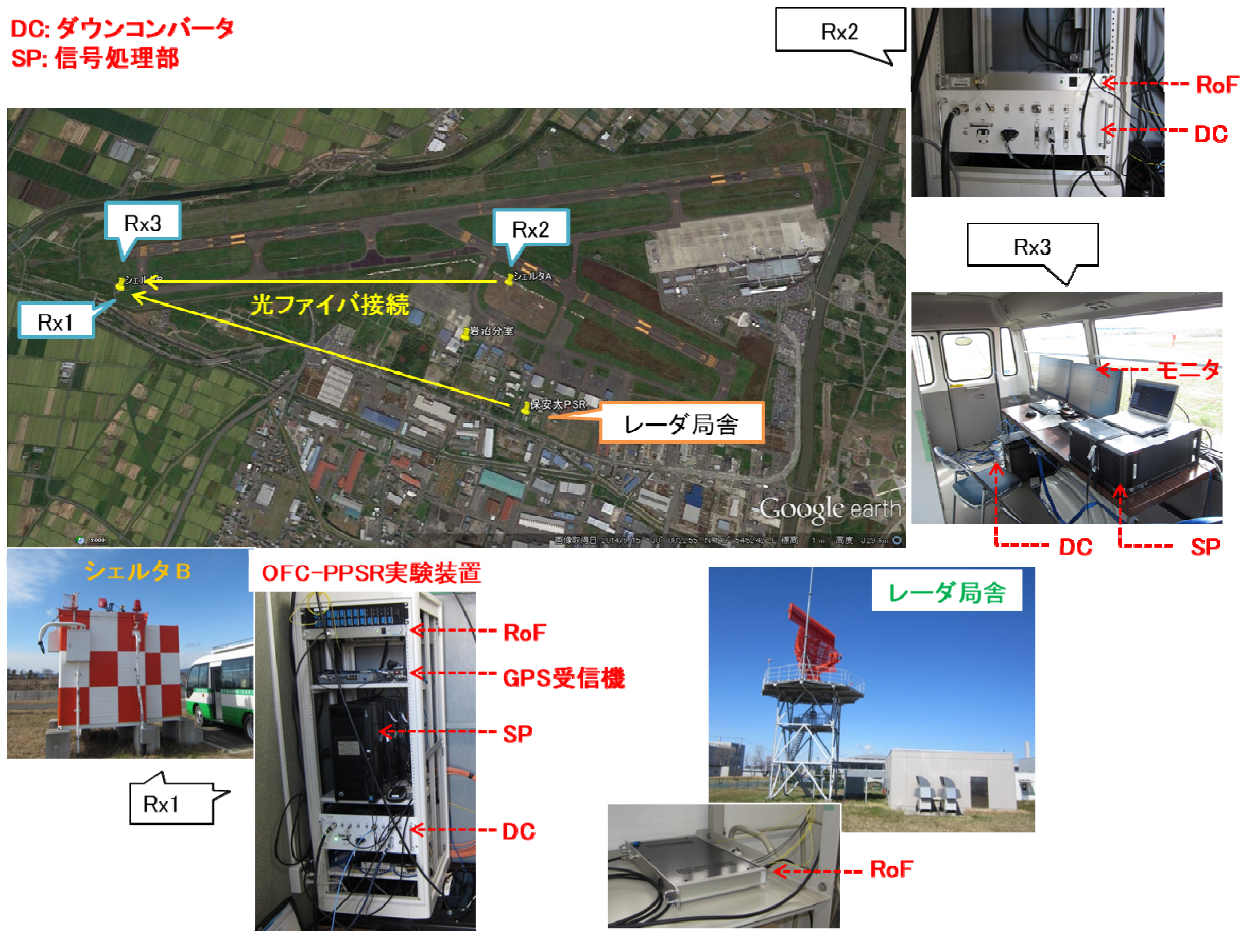


図6 仙台空港に展開した実験システムの位置関係

③ 受信機

④ 信号処理部 2

基本は以上のような構成となり、それぞれ処理した結果を格納する共通のメモリおよび各装置を制御するための中央制御部からなる。なお、前節では直接波用のアンテナは不要との説明をしたが、検証用として本実験システムでは利用できるようにしている。

信号処理部 1 (SP1) については Rx1 と Rx2 に共通して動作する仕組みであり、一つの信号処理部に 2ch の構成としたものである。このとき、Rx2 は Rx1 とは別の場所に設置されており、RoF 伝送によって SP1 に信号を受け渡す。しかし、Rx1 の RF 伝送方式とは異なり、受信機側で IF 信号にした後、IF 信号を RoF 伝送する構成となっている。つまり、Rx1 側では受信機と SP1 は同じ場所にあるため RF ケーブルの接続のみであるが、Rx2 側の受信機と SP1 は光ファイバを中心とした接続体系となる。一方、

Rx3 は RoF を用いない構成で、取得データもしくは信号処理までを行ったデータを LAN 経由で HDD にデータ伝送する仕組みである。これは、光ファイバを取り回しできない時や移動型の受信機を想定した作りとなる。

3.3 PSR 信号の特徴と信号処理方法

ここで通常の PSR で利用される信号及び代表的な信号処理方法について確認する。PSR は $1\mu\text{s}$ 及び $80\mu\text{s}$ の 2 つのパルスを用いる長短パルス複合方式を採用している。短パルスは単純なパルス波形であるが、長パルスは分解能を得るために FM チャープがかかる。2 パルス方式となるのは、次のような理由による。探知距離を延ばすためには平均電力を稼ぐためパルス幅を長く設定する必要がある。一方、パルス幅が伸びると、最短探知距離も伸びてしまう。そこで、近傍の監視を実現するために長パルスの前に短パルスを送出し、遠近両方の監視を実現

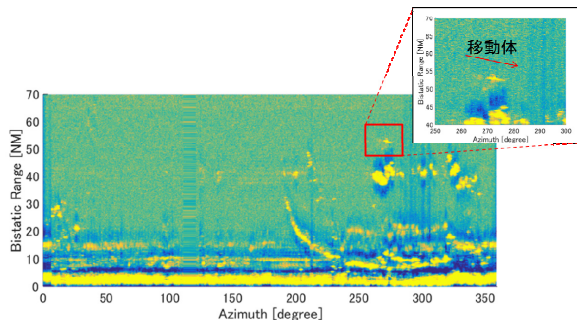


図7 実験結果 (Rx1)

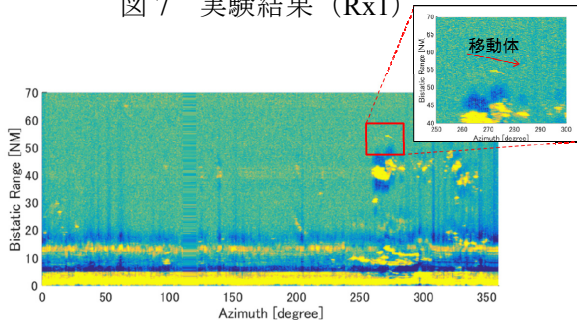


図8 実験結果 (Rx2)

する。

信号処理は、一般的なレーダ信号処理にのっ
とっている。本稿ではページの関係から省略す
るが、デジタル位相検波、パルス圧縮、干渉
除去が採用されている。更に固定物体からの不
要波（クラッタ）を除去するために、MTI
（MDF）処理、LOG-CFAR も採用される[4]。
OFC-PPSR にもこれらの実装は可能であるが、
初号機として試作した実験システムは、特別
な信号処理を実装しておらず、IQ 検波とパ
ルス圧縮までの実装となり、単純に得られた
信号を並べるだけにとどまっている。MTI や
LOG-CFAR については、本装置ではオフ
ライン処理となるため、後から別プログラム
にて動作するように開発した。

4 実験結果

本章は、仙台空港で実施した性能評価試験
における実験結果を示す。

4.1 実験環境

OFC-PPSR の実験システムを試作し、仙
台空港を実験場として実験システムを展開
した。送信信号には現行 PSR と同等の性
能を持つ航空保安大学校岩沼研修センター
の研修用レーダを採用した。レーダ送信機
のモニタ端子と局部制

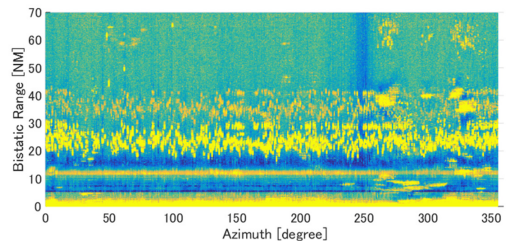


図9 実験結果 (Rx3)

御監視装置から得られる参照信号は、レー
ダ局舎に設置した RoF 装置から空港内に
設置した OFC-PPSR 受信機まで伝送する
仕組みとなる。

図6は仙台空港に展開した実験システムと
その位置関係を示す。レーダ局舎内に設
置した RoF 送信機から仙台空港場内の西
側の当所実験シェルタまで光ケーブルを通
り参照信号が伝送される。図5で示した
3つの受信機は、それぞれシェルタ A（
空港中央付近）、シェルタ B およびシェ
ルタ B に隣接して駐車した測定車に展
開した。また受信アンテナとして、Rx1
と Rx2 には標準ホーンアンテナ、Rx3
には無指向性アンテナを採用した。

4.2 実験結果

図7～図9に実験結果を示す。なおここ
で示す結果は、実験システムで取得され
たデータについて MDF 及び CFAR 処理
を行った後の結果である。また、これら
の図は5スキャン（20秒）のデータを重
ね書きしたものとなる。それぞれ、図7
は Rx1、図8は Rx2、図9は Rx3 の
結果となる。図中に示したように、Rx1
と Rx2 はバスタティックレンジで 50～
55NM 付近に移動体が検出された。一
方、RoF を用いない Rx3 は、雑音が多
く正しく処理されていない結果となっ
た。これは、無指向性アンテナを利用し
たため利得が低いこと、また受信点は
送信局からは完全な見通し内とはなら
ず、参照信号である直接波の信号が正
しく受信されなかったことなどが要因
と考えられる。

これらの結果から、通常の PSR 同様
に移動体の検出が可能であることが分か
った。これまでの実験結果から推測す
ると、RoF により直接波を参照する場
合は安定して信号を取得できるため、
散乱波受信用のみの装置を空港内に展
開し、RoF の受信部分は信号処理部に
一体化する

ことによって、直接波アンテナを用いる方式よりも簡素化した分散型 PSR の仕組みをとれる可能性があることが分かった。

4.3 OFC-PPSR の可能性

これまでの成果から、OFC-PPSR の可能性について下記のようにまとめることができる。

- ① 受信機を分離したとしても PSR 同様の動作が可能
- ② 一般的に用いられる PBR の直接波用のアンテナを設ける必要がない
- ③ RoF を使用することにより直接波を使うより高い S/N を得ることができ、また設置環境に依存せず安定した動作が可能
- ④ 受信機は散乱波検出用としてしまい、RF もしくは IF 信号を中央処理装置まで伝送できるようにすることで、受信局の簡略化が可能
- ⑤ 装置を展開できる範囲において、既設レーダで未検出のエリアの補間が期待できる

5. まとめ

本稿は当研究所で研究を続けている MSPSR のコア技術の一つとして開発した OFC-PPSR の概要について説明し、仙台空港で実施した実験結果を示した。受信機分離型の利点としては、送信側に戻らない電波を捉えて移動体の検出ができることである。また OFC-PPSR では通常の PSR と同様に参照信号として送信信号を得ることができるため、PSR と同等の動作をすることも可能である。また、このとき直接波用のアンテナは不要で、受信機はレーダから見通し外に設置したとしても動作する。実験結果から、移動体の検出が可能であることが明らかとなった。

今後は本システムに有用な信号処理方法の検討とリアルタイム処理およびマルチスタティック化を目指したシステム開発を進めたいと考えている。

謝辞

本研究にあたり実験にご協力いただきました航空保安大学校岩沼研修センターならびに仙台空港関係者に深く感謝申し上げます。

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] M. I. Skolnik et al., *Introduction to RADAR systems*, 3rd ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill, 1962.
- [5] J. Honda and T. Otsuyama, “Feasibility Study on Aircraft Positioning by Using ISDB-T Signal Delay,” *IEEE Ant. and Wireless Propaga. Letters*, DOI.10.1109/LAWP. 2016.
- [6] 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.