

## D05 受動型レーダの開発

○ 塩見格一（電子航法研究所）、青山 秀次（アイ・アール・ティール）

Development of Passive Radar  
Kakuichi Shiomi (ENRI), Shuji Aoyama (IRT)

Key Words: Equipment, Passive Radar, SSR, Passive SSR

### Abstract

The Secondary Surveillance Radar (SSR) is used for air traffic control monitoring of aircraft in airspace. The Passive SSR (PSSR) is a system that operates as a slave system of the conventional SSR as a master system, and it provides Mode-A/C and Mode-S SSR information without any radio transmissions for transponder interrogation. The PSSR has many realization forms, and has the possibilities to be grown to the advanced airspace surveillance system.

### 1. はじめに

受動型レーダは自らが電波を出すことなく、目標物の反射する電波を受信するだけで、その位置や更には形状を特定しようとするシステムである。

一般的に反射波は微弱な電波であり、通常のレーダにおいても巨大なアンテナを利用して利得を稼いでおり、予め監視対象の方位を特定しなければ、有効な監視情報を得ることは難しく、システムは走査型のパラボラ・アンテナ等を構成要素としている。このようなレーダを親局として想定し受動型レーダを実現しようとした場合、従来報告されて来たシステムは、受動型レーダの側において航空機から反射して来た電波の到来方向を特定する高性能な指向性アンテナを有することを特徴としている。これらのシステムは従来、軍用として開発が進められて来たものであり、特定の航空機等目標物の追尾を目的とするシステムであって、或は想定される方角から飛んで来るミサイルを見つけるためのシステムであって、全空域の監視を目的とする様なものではない。全空域の監視を実現するためには、多数の高性能な指向性アンテナを有する、即ち高性能な方向探知機の様な受信システムが必要になる。<sup>[1, 2]</sup>

今日、航空管制指示の発出に要する航空機の運航情報の取得等、民間航空機の監視に使用されているレーダは、第2次世界大戦時に実用化された敵味方識別装置をその起源とする、2次監視レーダ(SSR: Secondary Surveillance Radar)と呼ばれるものであって、レーダの発出する質問信号に対して航空機が応答信号を発出するシステムである。SSRは直接に物体に反射された電波を直接に処理するものではないので、レーダで観測した様な情報を与えるが、本来の意味でのレーダ(PSR: Primary Surveillance radar)ではない。微弱な

反射波の処理を想定しないため、SSR親局から発出される電波は同程度の覆域を想定するPSRに比較して1/1,000～程度の強度で十分であり、また航空機からの応答信号強度はPSRの走査信号の反射に比較して～1,000倍以上であり、SSRはPSRに比較して低電力で且つ遥かに信号雑音比に優れたシステムを実現している。

SSRは本来的にはレーダとは異なる原理に基づいたシステムではあっても航空機が在る位置に存在して、その場所で特定される時刻に無指向性の応答信号を発出している訳であるから、その航空機からの応答信号を、質問信号を発出する親局とは別の位置で受信して航空機の位置を計算することは可能である。

羽田等の大規模空港に整備されているマルチラテレーション・システムではMode-Sスキッタを時刻同期した複数の受信局で受信し、受信時刻の差から導かれる複数の双曲線の交点として航空機の位置を算出しているが、これはレーダとは別なシステムと考えられている。

電子航法研究所では、1980年代より、航空機からのSSR応答信号を受信し、マルチラテレーション・システムとは異なる原理で、その航行位置を算出する受動型SSR(PSSR: Passive SSR)の研究開発を進めてきた。<sup>[3, 4]</sup>

全空域の監視を目的とする受動型レーダの実現には無指向性のアンテナが必要であり、受信すべき電波が弱い場合には利得の高い指向性アンテナを多数組み合わせる等の手法によりこれを実現する必要があるが、PSSRとすればPSRの反射波に比較して遥かに強い航空機からの応答信号を受信できれば十分であるから、利得の小さい無指向性のアンテナを使用しても数十マイル以上の覆域を実現することは難しくはない。

## 2. 原理等

図1は2次元で表現した航空機の航行位置の算出原理である。本来航空機的位置は3次元で与えられなければならないが、図の複雑さに依る誤解を避けるため、先ず2次元平面における近似により測位原理を説明する。

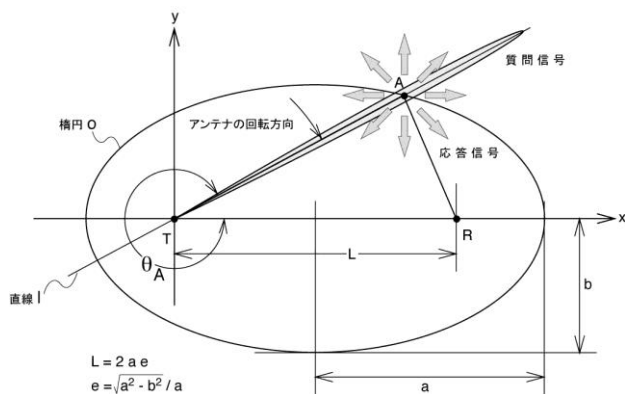


図1 航空機位置算出原理（2次元）

図1において、Tは航空機に対し質問信号（1.030MHz）を発出する親局SSRの走査型アンテナの回転中心であり、RはPSSR受信局において航空機からの応答信号（1.090MHz）を受信する無指向性アンテナの設置位置である。航空機はAの位置でTからの質問信号を受信し、全方位に応答信号を発出する。

当所方式以外の受動型レーダにおいては、受信局において、航空機の反射した電波や航空機からの応答信号の伝播方向を計測していたが、当所で開発して来たPSSRは、航空機からの応答信号は無指向性アンテナで受信しているため、受信局においては直接には航空機の方位を知ることができない。そこで、当所方式によるPSSRでは、その設置位置において親局SSRの質問信号を受信し、親局の走査型アンテナに正対する時刻から、その回転周期を計算し、併せて質問信号のMode-A/Cの繰り返しパターンを得る。PSSRは親局SSRの走査型アンテナが一定角速度で回転し、等時間間隔の一定のパターンで質問信号を発出していることを想定し、親局SSRとPSSRとの距離が一定である事と併せて、「何時、どの方向に質問信号が発出されたか。（親局SSRのオペレーション・プロフィール）」を生成し、これにより航空機からの応答信号を受信した場合に、その応答信号を与えた質問信号が「何時、どの方向に向かってなされたものか。」推定し、応答信号受信時刻から算出される測位楕円と、親局SSRからの質問方位との交点として航空機の応答位置を算出する。

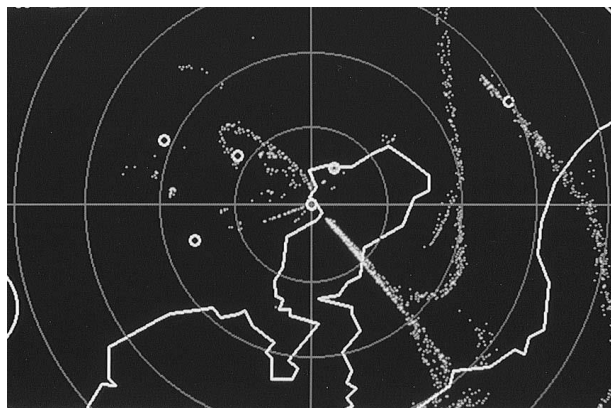


図2 羽田空港周辺空域の監視情報

図2は、1992年4月に当所が（株）日本プレジジョンと試作開発したPSSR（図3を参照）を東京ヘリポートに設置して周辺空域を観測して得た監視情報である。十数分間の観測により、羽田空港に進入する航空機が千葉県上空で合流の様子が、洋上から成田空港に進入の様子が捉えられている。

なお、親局SSRの質問信号のビーム幅が3度程度であるため、PSSRでは1回の正対において約20回の質問信号を受信する事が可能であり、上記の観測に必要なインタロゲーション・プロフィールを生成する事ができる。

図3は当所における試作初号機の外観とそのアンテナ・システムである。Bendix/King社製のトランスポンダを改修して製作した質問信号受信機及び応答信号受信機が本体ラックの一番上に取り付けられている。当時はLバンド受信機の製作は容易ではなかったため、1.030MHz受信機のキャビティを削って1.090MHzの受信機を実現した。

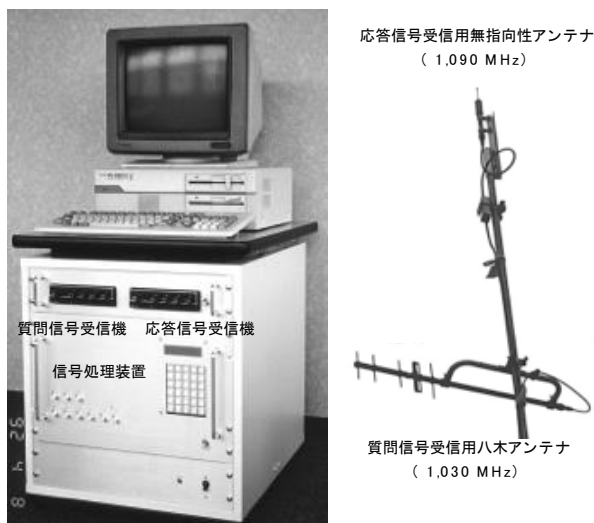


図3 受動型SSR試作初号機

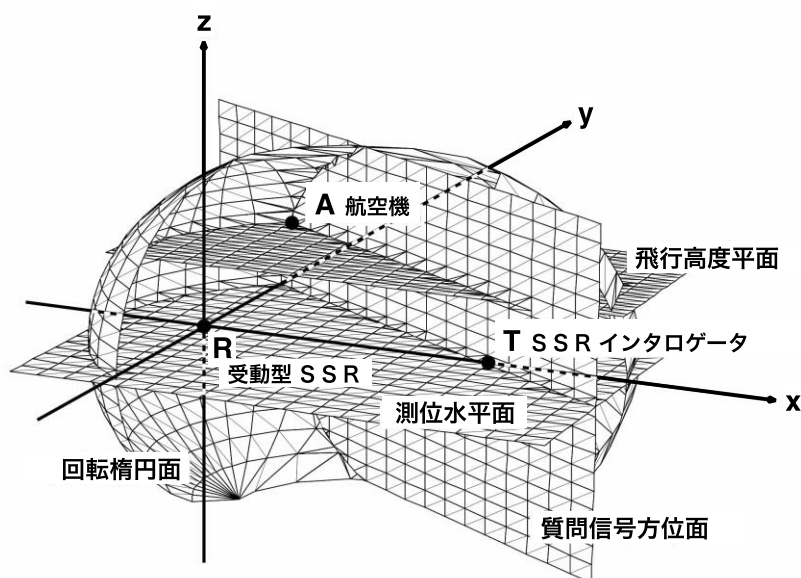


図4 航空機位置算出原理（3次元）

図4は3次的に表現した航空機の航行位置の算出原理である。航空機の位置は質問信号発出時刻と応答信号受信時刻及び親局 SSR と PSSR の距離から生成される回転楕円面と、親局 SSR から質問信号方位面、航空機の飛行高度面の交点として与えられる。

なお、航空機の飛行高度については、航空機からの Mode-C 応答による気圧高度から算出するた

め、必ずしも正確なものとは言えないかも知れないが、筆者等は2次元近似よりは正確な位置が算出されているであろう事を期待して、以下により3次的に航空機の位置を計算している。

地表面の局率を無視すれば、航空機の位置は、以下の(1)～(3)の連立方程式を解くことにより、(4)～(6)の様に得られる。

$$1 = \left( \frac{x - \frac{a}{2}}{\frac{b}{2}} \right)^2 + \frac{y^2 + z^2}{\left( \frac{b}{2} \right)^2 - \left( \frac{a}{2} \right)^2} \quad (1)$$

$$y = x \tan \theta \quad (2)$$

$$z = h \quad (3)$$

$$x = \frac{a(a^2 - b^2) - \text{sign}(\cos \theta) b \sqrt{4a^2 h^2 + (a^4 - 2a^2 b^2 - 4h^2 b^2 + b^4) \sin^2 \theta}}{2(a^2 - b^2 \sin^2 \theta)} \quad (4)$$

$$y = \text{sign}(\sin \theta) \frac{\sqrt{a^4 - 2a^2 b^2 - 4h^2 b^2 + b^4}}{2b} \quad (5)$$

$$z = h \quad (6)$$

$$\text{sign}(x) = 1, \text{ when } x \geq 0$$

$$\text{sign}(x) = -1, \text{ when } x < 0$$

### 3. 最近の開発状況

1980年代の終わりに開始した当所における受動型SSRの研究開発は2002年頃まで間欠的に継続してきたが、ADS-Bの普及が期待される状況となったため、その時点で一旦打切る事となった。

その後、空港環境騒音の計測に要する航空機の航行位置を算出する装置としての需要に対応するため、2008年に、(財)空港環境整備協会、リオン(株)との共同研究として、実用機プロトタイプを試作を目的としてPSSRの研究開発を再開した。嘗ては困難であったLバンド受信機等機能構成要素の製作も高性能なFPGAの普及により、従来に比較して遥かに容易になっており、IRT社において、2009年には、初号機と同様な機能を実現したPSSRを実現する事ができた。図5は航空機からの応答信号を受信する無指向性アンテナと親局SSRとの正対質問信号を受信する八木アンテナから構成されるアンテナ・システムであり、これは先に図3として示したアンテナ・システムと同等なものである。図6として示す信号処理部は19インチ標準ラックの5Uの箱に収まる程にコンパクトに作られており、USBケーブルによりパソコンに接続する事で、図7に示すような空域監視情報を表示する事ができる。



図5 アンテナ・システム



図6 信号処理部

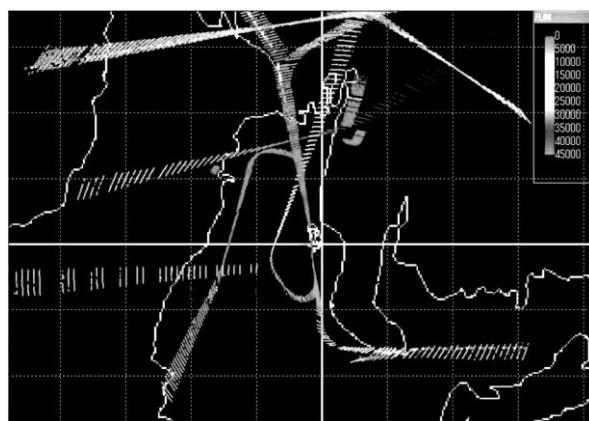


図7 中部国際空港周辺空域の観測結果

図7は図2と同様に数分間の観測情報を重ねて表示しているため航空機の航跡が示されている。所々にコーストと思われる監視情報の欠落が見られるが、質問信号ビーム幅で測位楕円を切り取った一連の楕円弧がふらつき等も見せずに航空機の航跡を示している。

PSSRの測位精度は、図1及び図4からも明らかな様に、自局PSSR設置位置と、親局SSRの位置と、航空機の飛行位置との関係で決まる。質問信号ビーム幅は一定であっても、測位楕円が扁平なものとなれば、航空機の位置に依存して上記の様に切断される楕円弧は長くなり、測位精度は低下する。通常のSSRにおいては、自局SSR以外からの質問信号に対する航空機からの応答信号はフルーツと呼ばれる妨害にすぎないが、PSSRにおいては、航空機が複数のSSR局の覆域を航行している場合には、全てのSSRを親局として設定する事が可能であり、例えば2つの親局を設定すれば図8に示す様に、航空機の位置を複数の楕円弧の交点として算出する事で測位精度の向上を図る事ができる。

PSSRにおいて複数の親局SSRを設定する事はコストを低減させる意味においても有効な事である。

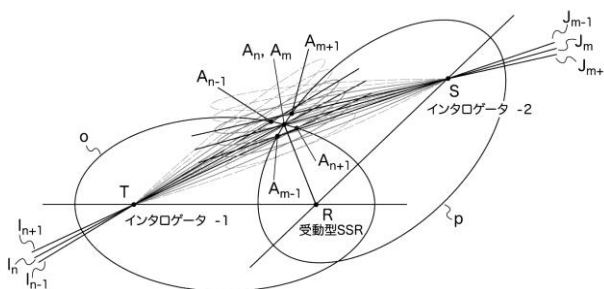


図8 2つの親局SSRを設定する場合

#### 4. 今後の展望

現在、当所方式による PSSR は、空港環境の評価に係る計測装置等として、幾つかの装置が我が国においては既に実用に供されている。

今後の PSSR の更なる発展のために何を為すべきか考えれば、一般的なレーダの高性能化としての測位精度の向上、監視覆域の拡大等々は当然のことながら、製品としての完成度の向上には、低価格化を第一に、小型化、省電力化、耐久性の向上、運用開始に係る作業の自動化等々、ユーザビリティの向上も必要不可欠である。

現時点において PSSR は、空港周辺の親局 SSR の質問信号が十分に受信できる環境における運用では、空港環境評価等の要求に十分に対応すると思われるが、親局として設定可能な SSR から遠くはなれているような場合については、未だ十分な評価試験は完了しておらず、現状の PSSR の空域監視機能には確認されていない事柄が幾つもある。

原理的には、空港に設置されている SSR ではなく航空路監視用に運用されている SSR を親局として設定する事は問題ないと考えられ、急激な姿勢の変更等を伴わない巡航状況の航空機を監視する事は問題なく可能と思われるが、ターミナル空域においては、PSSR に限らず現状の SSR であっても、飛行中の航空機の姿勢に依っては、SSR 質問信号が受信できないために応答信号が発出されない状況が発生しコストの原因となる。今日、空港における ASR の運用の必要性の一つは、存在するにも拘らず SSR では検出されない航空機の検出にあり、ASR を伴わない PSSR においてこれは解決の困難な問題である。

そこで我々は、現用 ASR において運用されている PSR の反射波、また SSR 質問信号の反射波を受信して、その空域に存在する航空機の見落としを低減し、併せて測位精度の向上を図ることを検討した。

図9は、小牧空港の SSR を親局として、その質問信号の反射から算出した航空機の軌跡である。

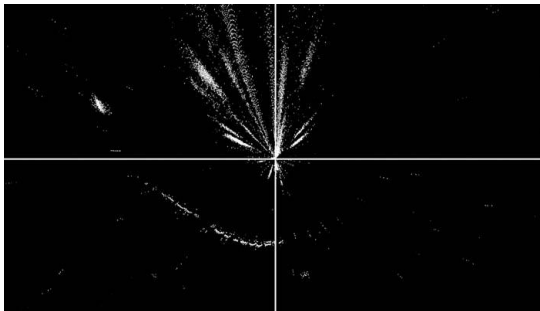


図9 2つの親局 SSR を設定する場合

図9の中心は、小牧空港の SSR 走査型アンテナの設置位置であり、中心から上方向に放射状に延びている影はノイズである。第3象限に見える点線状の影が航空機の飛行した航跡であり、第2象限の中央左下の影は高層ビル等の固定物標である。SSR 質問信号は反射波の受信を想定したものであるため PSR 探査信号と比較して 1/1,000~程度の強度しかなく、その反射波は更に微弱であるから、現時点で最も低雑音な受信機を使用しても、実現できる検出測位性能は、親局 SSR から 10km 程度の位置に受信局を設置した場合に、その受信位置から 10km 圏内で航空機の反射断面積が比較的広い姿勢にある時に検出可能な程度である。当然の事ながら、ASR 探査信号の反射波を利用することとすれば、これは SSR 質問信号の反射波と比較して2桁以上も強力な電波であるから、上記航空機の検出可能な覆域は大幅に拡張される。

SSR に対する航空機からの応答信号は、無指向性のアンテナにより発出される比較的強い電波であるが、PSR 探査信号や SSR 質問信号の反射波は微弱である事に加えて、親局と航空機の位置関係から決まる指向性を有しており、反射断面積の関係から航空機の姿勢も問題になり、従来の PSSR の様に1ヶ所のみでの設置では全空域を監視する事は到底できそうもない。

しかし、PSR 探査信号や SSR 質問信号の反射波に対する多数の受信機をネットワークにより接続したシステムの実現可能性を考えれば、今日の技術を以てすれば不可能なことではない。多数の受信局がネットワークにより接続されたシステムにおいては、全ての受信局で夫々に想定する親局 SSR の正対質問信号を受信する必要はない。親局 SSR の正対質問信号の受信は、その親局 SSR のオペレーション・プロファイルを知るために必要なことであるから、親局 SSR の近傍に存在する受信局において十分正確にその親局 SSR のオペレーション・プロファイルが解析できれば、その情報をネットワークにより配信することにより、その SSR 局を親局として想定する他の全ての受信局においては、航空機からの応答信号のみを受信すれば、夫々の受信局において個別に親局 SSR のオペレーション・プロファイルを生成していた場合と同様に、航空機の位置を算出することが可能である。地形的な障害や建築物の影等の影響により直接には想定する親局 SSR の正対質問信号を受信できない様な PSSR 設置条件であっても、航空機がその設定する親局 SSR の覆域に存在し、その航空機からの応答信号が受信できれば、その PSSR において、その周辺空域の監視を行うこと

が可能となる。このことは PSR 探査信号や SSR 質問信号の反射波に対しても全く同様である。

最近の SSR の更新においては、新たに設置された SSR において質問信号の発出タイミングにスタガが施される場合が見られる。従来の PSSR によっては、親局 SSR の質問信号発出タイミングにスタガが施された場合には、正確なオペレーション・プロファイルを生成することができず、従って航空機の航行位置の算出が不可能となる。親局 SSR のスタガに対処するためには、PSSR においては、周期的な親局 SSR との正対質問信号の受信に加えて、常時継続的に親局 SSR の発出する SLS 信号を受信する必要がある。PSSR において親局 SSR の発出する SLS 信号を常時受信することで、全方位への質問信号の発出時刻を知ることが可能となる。SLS は親局 SSR から無指向性アンテナにより発出される信号であるが、送信出力が小さいため、PSSR が親局 SSR から遠方に設置される場合には、正確なオペレーション・プロファイルを生成可能な程の信号雑音比で受信することは難しくなる。今後、更新される SSR がスタガを有するシステムに移行すれば、現状の PSSR の運用可能な場所は空港周辺等のかかなりに限定的なものとならざるを得ないが、空港から遠方に設置された PSSR であっても、インターネット等を介して、空港周辺に設置された PSSR 局から、その空港に設置される SSR の正確なオペレーション・プロファイルを得ることができれば、空港周辺の PSSR 局と同様に、その周辺空域の監視情報を得ることは十分に可能となる。

## 5. おわりに

嘗て筆者等が PSSR の試作開発を開始した当時 L バンド受信機の製作は容易なことではなく、またパソコンの処理性能も今日に比較すれば些細なものであって、PSSR 初号機は、植田知雄氏を始めとする（株）日本プレジジョンの技術者諸氏の PSSR 実現にかけた情熱なくしては、実現不可能であったことは間違いない。

今日、上記状況は一変しており、GNU の精神を受け継いだ GNU-Radio 等を採用すれば、週末の趣味として L バンド受信機を製作することも可能となっている。また今日、ノート型パソコンであっても PSSR 初号機に採用したホスト PC に比較して 3 桁以上の処理性能を有しており、PSSR はパソコン上のアプリケーションと考えることも可能な状況に至っている。

親局 SSR のオペレーション・プロファイルを生成するプロファイラの実現には低雑音化技術等の

難しい面も残されてはいるが、比較的強い信号を扱う航空機からの応答信号の受信に関しては GNU-Radio 等を採用することで、インターネットに接続されたパソコンに十数万円の拡張装置を接続して PSSR を実現することは今日既に十分に実現可能なことであって、近い将来に数百台程度の PSSR を接続した広域監視システムを実現することも十分に可能なことと思われる。

多数の受信局を設置し相互にネットワークで接続すれば、PSSR のみならず PSR 探査信号や SSR 質問信号の反射波への対応も含めて、筆者には、現状の空域監視システムに相当する受動型空域監視システムの実現は十分に可能と思われるが、「どの程度の多数の受信局が必要となるのか?」、「経済的な合理性はあるのか?」と言った問いに答えられる様に、今後の研究開発を進めて行きたいと考えている。

## 謝 辞

筆者が、電子航法研究所に奉職以来係って来た受動型 SSR システムにつき、その実現にご協力いただいた（財）空港環境整備協会殿、リオン（株）殿、またこれらご関係者各位に、また特に本職に受動型 SSR をご教授いただきました植田知雄氏に、深く感謝致します。

## 参考文献

- [1] 浅田, 小原, 他, “ISDB-T 放送波を用いたパッシブレーダに関する研究”, 防衛省技術研究本部技報, 第 7012 号, 平成 20 年 10 月.
- [2] 諏訪, 中村, 森田, “地上デジタルテレビ放送波を用いたパッシブレーダの実証研究”, 三菱電機技報, Vol.84, No.11, pp23-28, 2010.
- [3] 塩見, 植田, “受動型 SSR の機能構成及び評価”, 信学技報, Feb. 1998.  
<http://ci.nii.ac.jp/naid/110003288823>
- [4] T.Ueda, M.Ino, K.Imamiya and K.Shiomi, “Passive Secondary Surveillance Radar System for Satellite Airports and Local ATC Facilities”, 43rd Annual Air Traffic Control Association, Fall, 1998, Atlantic City, NJ, USA.