

19. 受動型SSR試作開発の成果と今後の課題

機上等技術領域 ※塩見 格一
航空交通管理領域 瀬之口 敦

1. はじめに

― 各種受動型レーダと当所独自の受動型 SSR ―

受動型レーダは、近年、電波資源の有効利用の観点から着目される機会が増えているシステムである。受動型レーダは自らが電波を出すこと無く、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り、従来、軍事的な技術として研究開発されてきた。^[1,2]

上記受動型レーダは放送電波の反射を想定したシステムであり、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。今日、実用性を示す様な技術的な成果が報告されているシステムは、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り、全空域の監視を目的とするものではない。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。

航空機による反射波ではなく、航空機からの SSR 応答信号を受信して航空機の位置を特定する場合には、今日の空港等ではマルチラテレーション技術が利用されており、Mode-S スキッタを時間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が算出されている。

航空機による反射波であっても、「どのパルスがどの航空機に依るものか？」特定できれば、マルチラテレーション測位により、航空機位置等を特定できるが、受信信号と航空機との対応付けは容易ではない。受動型レーダの歴史は 50 年以上あるにも拘

らず、やっと近年受動型レーダが着目される機会が増えたのは、強力な地上デジタル放送波の利用が想定されるようになったからに他ならない。

さて本稿で紹介する受動型 SSR (PSSR: Passive Secondary Surveillance Radar) は、上記の何れのシステムとも異なる当所独自のシステムである。PSSR は 1980 年代に日本プレジジョン社の植田知雄氏により研究開発が開始され、1989 年に当所において 1 号機が試作されたものである。その特徴は、他のシステムが測位に要する測角情報を自ら算出しなければならないのに対して、我々の PSSR は「測角情報を親局 SSR のオペレーション・プロファイルから推定する。」ことにある。親局が質問信号を発出した方向を推定し、測角情報としているのである。

2. 第 1 号機から SKYGAZER まで

原理の説明の前に PSSR により観測された航空機の運航航跡を図 1、及び図 2 として示す。図 1 は 1989 年に試作した第 1 号機により関東空域を 10 分程度観測して得た航空機位置情報を重ねて表示したものであり、図 2 は 2009 年に実現した SKYGAZER により中部空域を同様に 10 分程度観測して得た測位情報を表示したものである。航空機は親局 SSR の毎回の走査に対して 20 回程度の応答を返すので、図 2 においては、質問信号のビーム幅に対応する楕円弧が表示されている。

SKYGAZER とは「空を見つめる者」の意で、共同研究者であった(財)空港環境整備協会殿の提案により名付けられた。SKYGAZER は観測覆域として半径 50km を実現し、ADS-B 位置通報に対して 100m 程度の差異の測位精度が実現された。



図 1 1 号機による関東空域の監視画像

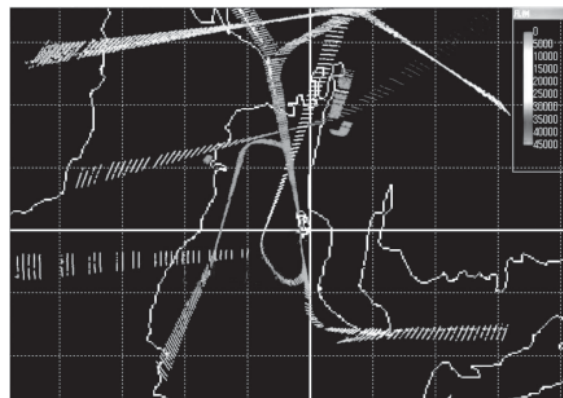


図 2 SKYGAZER による中部空域の監視画像

図 3 は、2 次元的に近似した PSSR の航空機位置の算出原理である。

図 3 において、T は親局 SSR のアンテナの回転中心であり、R は受信局のアンテナ設置位置である。航空機は A の位置で T からの質問信号 (1,030MHz) を受信し、全方位に回答信号 (1,090MHz) を発出する。PSSR では、親局 SSR からの質問信号を受信することで、質問信号の正対時刻と走査周期、質問パターンを推定する。

質問信号の正対時刻と走査周期、質問パターンが、先の親局 SSR のオペレーション・プロファイルであり、試作 1 号機から SKYGAZER まで、PSSR 設置位置において航空機からの回答信号を受信する無指向性アンテナに加えて、1,030MHz の質問信号を受信する八木アンテナを設置し、オペレーション・プロファイルを観測取得している。

図 4 は、PSSR 第 1 号機の信号処理部と表示部、またアンテナの写真である。図 4 のパソコンの台の部分部分が PSSR 本体であり、本体の一番上に 2 つ並べて置かれているものは Bendix/King 社製のトランスポンダを改修した受信機である。片方は 1,030MHz のキャビティを鑿で削って 1,090MHz を受信できる様にしている。

図 5 は SKYGAZER のアンテナと信号処理部である。信号処理部により算出された航空機の位置情報は USB ポートを介してパソコンに転送できるようになっている。第 1 号機に比較して SKYGAZER はかなりコンパクトになっており、コンテナに収納して一人で持ち運ぶことができる程である。

なお SKYGAZER では、オペレーション・プロファイルの観測に、正対時の質問信号のフレームの観測

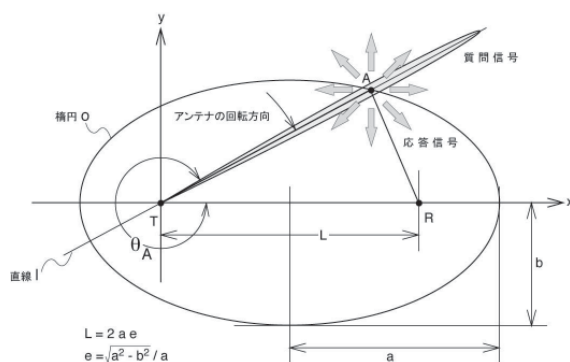


図 3 航空機位置算出原理

に加えて、経常的に質問信号の内の SLS も検出している。SLS の観測は、正対時のみの質問信号のフレームの観測に比較して、PSSR の親局 SSR に対する同期がより正確に取れるであろうことを期待して実装した機能である。しかしながら、現実の運用においては、PSSR の設置位置が親局 SSR の直ぐ近く (~1km) である様な場合、SLS のマルチパス信号の方が直接波信号より大きくなる様な現象も発生し、正対信号だけで同期を取る方が安定な運用が可能な場合もある。案外、ASR や ARSR の走査アンテナの回転は想像以上に安定であり、SLS 同期が必要な場合は、例えば、Mods-S 質問に設定されるスタガに対応する必要がある場合等に限られるのかも知れない。

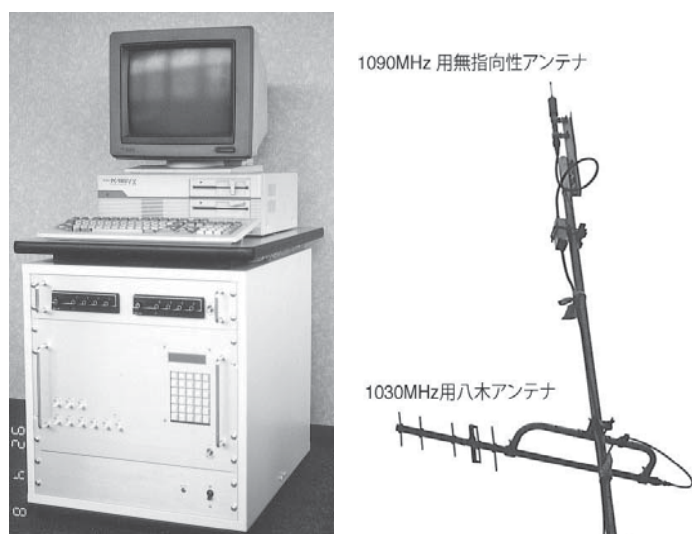
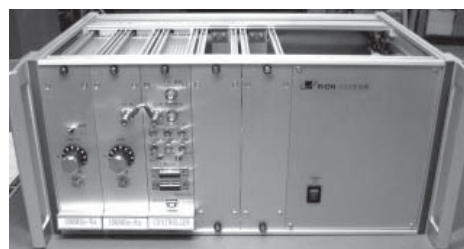


図 4 PSSR 第 1 号機外観とアンテナ



アンテナ



信号処理部

図 5 SKYGAZER

第 1 号機から SKYGAZER までの試作システムにおいては、親局 SSR のオペレーション・プロファイルの推定を、PSSR 設置位置で行っているため、PSSR は親局 SSR を見通せる場所に設置する必要が有った。しかしながら、今日的なデータ通信技術や GPS 等に依るグローバル・クロック技術を利用すれば、必ずしも PSSR 設置位置を親局 SSR からの見通せる範囲に限定する必要はない。

想定する親局 SSR のオペレーション・プロファイルは、質問信号がマルチパス等の妨害なく、できるだけ綺麗に受信できる箇所で行うこととして、その観測情報をデータ通信によりリアルタイムに PSSR に送れば、伝送遅延も含めて必要な較正を行うことは可能である。また、今日では、ADS-B により自機位置を発出しながら運航している航空機も多く、これらもリファレンスとすることで、オペレーション・プロファイルの精度を補強することができる。

PSSR の測位精度は、図 3 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。自局 PSSR 設置位置と親局 SSR の位置が決まれば、航空機の運航位置について、高い測位精度が実現される空域は限定され、或る空域に対して高い測位精度を要求すれば、親局 SSR の位置が決まっている場合、自局 PSSR の設置位置は限定されることとなる。

また PSSR は、親局 SSR が複数受信できる場所に設置可能な場合、複数の親局を設定することで、測位精度を向上させることが可能である。例えば、図 6 に示す様に親局 SSR を 2 つ設定できれば、それぞれの親局に対して航空機の存在位置を示す線分が算出可能であり、航空機のその交点付近に高い確率で存在することが期待される。

なお、図 2 に見られる様に、質問信号のビーム幅により親局 SSR の毎回の走査で各航空機は、それぞれ 20 回程度応答するので、航空機の位置は線状に広がって算出される。素直に考えれば航空機の存在位置は線分（実際には測位楕円の一部分）の中央と思われるが、必ずしもその様にはならないことが実験

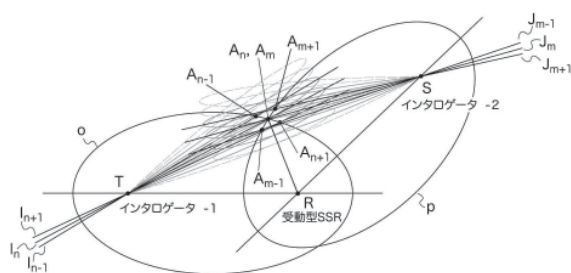


図 6 航空機位置算出原理

的に確認されている。図 2 においても、或る質問信号に対する応答信号による楕円弧が、その前後の楕円弧に比較して半分くらいの長さになっている様な例が何ヶ所も見られる。明らかに、航空機が短くなった楕円弧の中央辺りに存在したとは考え難い。また、航跡において或る走査においては航空機が応答していない時間帯が存在することも図 2 に見られる通りであり、受動型 SSR においては、コーストへの対応の観点からも複数の親局が設定できることが運用上好ましい。

3. 今後の展望

SKYGAZER は試作品の域を越えて、実用品としての完成度を実現した国産初の PSSR システムである。今後の更なる PSSR の発展のために何を為すべきか考えれば、一つは**低価格化**であり、もう一つは**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**、等々における要求に対応する高性能化である様に思われる。当然のことながら、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、等々は経常的に対応していかなければならない課題でもある。

PSSR に限らずとも現状の SSR では、特にターミナル空域において飛行中の航空機の姿勢に依っては、SSR 質問信号がうまく受信できないため応答信号が発出されない場合等がある。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」にある訳であって、我々は、そこで上記の一般的な高性能化の前に、PSSR の枠を越えて、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目標としている。

微弱な電波を処理対象とする受動型レーダの実現において、監視覆域の拡大は技術的には容易なことではないが、将来的には受信機フロントエンドの低雑音化で対応可能と考え、一先ず、現状で実現可能な、出来るだけ低雑音な受信機を使用して、受動型レーダの研究開発を進めることとした。

現在 PRIUS-1/2 と名付けて試作開発を進めている受動型 SSR は、SKYGAZER よりもずっとコンパクトに纏めており、図 7 に示す様に、マストを除き、アンテナを含む全ての構成部品をソファの上に置いても問題ない程に小さなコンテナに収納することができている。コンテナの手前に見える立方体は本体を 6 時間動作させるためのバッテリーであり、当然のことながらコンテナに収納可能である。



図 7 次機受動型レーダ（PRIUS-1/2）

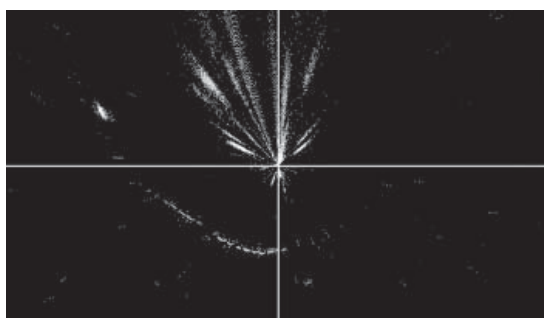


図 8 SSR 質問信号の反射から算出した航跡

図 8 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。図の中心が小牧空港 SSR の設置位置であり、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跡は、航空機が右下方向に飛行した航跡である。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。

受動型レーダ PRIUS の実用化の難しさは、SSR 質問信号の反射波が極めて微弱であることに因り、現状では、SSR 質問信号の反射波を想定する限り、大型機の側面による反射によらなければ、また空港の近隣空域（空港から 10km 程度に受信局を設置した場合に、その受信位置から 10km 圏内の航空機が検出可能。）でなければ、その位置を算出できない。なお、当然のことながら ASR の反射波を利用すれば、2 桁以上も強力な電波であるから、SSR 質問信号を利用する場合に発生する問題は大きく緩和される。

4. おわりに

以上は、筆者が 1988 年に当所に入所以来、間歇的には有ったが、現在まで試作開発を進めて来た

受動型 SSR に関する技術開発の経緯と成果である。これらの成果は、ハードウェアとアナログ信号処理に関する高度な技術を有している方々に依る処が殆どであることも確かである。この様な現状において、今後の PSSR の開発を、誰でも土日に楽しめる趣味へと普遍化させるかも知れない GNU Radio について、おわりに少し触れておきたい。

GNU Radio は GNU の精神を受け継いで、「誰でも、ADS-B 受信機作れます。」と言った感じの、ソフトウェア・ラジオの汎用プラットフォームである。

現実には、GNU Radio 上に ADS-B 受信機を実現するためのソース・コードは公開されており、このコードを少し書き換えて 1,030MHz の SSR 質問信号も受信・解読できるようにすれば PSSR はできそうに思われる。GNU Radio のソース・コードを読むことは必ずしも容易ではなく、当然のことながら電波に関する知識も必要であるが、一切の電子回路基盤工作等が不要になれば、GNU Radio で PSSR が一旦実現されれば、「PSSR はパソコン上のアプリケーションの様に見える存在となる。」訳であって、その後のアプリケーションの展開には大きな可能性が期待される。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 が実現されれば、数百台程度の PSSR を接続した広域監視システムの実現も不可能とは思われない。

筆者は、是非、この様なネットワーク・システムを実現したいと考えている。

謝 辞

筆者が、当所において 20 年以上も係って来た受動型 SSR システムにつき、これに日の目を見せていただいた（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、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。

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。
- [4] 賀来，北館，“受動型 SSR による空港面上の航空機識別方法”，電子情報通信学会総合大会予稿，Mar. 1997。