

15. SSRモードSネットワークの性能評価について

航空システム部 ※宮崎 裕己 三吉 襄 古賀 禎

1. まえがき

監視機能を向上するとともにデータ通信機能を付加した二次監視レーダ(SSR)モードSは、我が国においても導入が開始されるが、このモードSはネットワーク化を図ることにより、モードSの持つ優れた機能および性能を十分に発揮させて、効率的で信頼性の高い航空機監視および空地データ通信を提供することができる⁽¹⁾⁽²⁾。我が国では、航空路については順次モードS化することが計画されていることから、今後のモードSの普及に備えるためにも、モードSネットワーク技術を確立するとともに、ネットワーク環境下におけるモードSの性能を把握しておくことが必要である。

当所では、SSRモードSシステムを開発し、監視およびデータリンクについて研究を進めてきたが⁽³⁾⁽⁴⁾、上述の背景から、モードSネットワーク評価システムを開発し、ネットワークの機能および性能に関する評価試験を実施した。機能試験では、モードSを高度運用するネットワークの諸機能が正常に動作することを確認した⁽⁵⁾⁽⁶⁾。性能試験では、モードSをネットワーク化して運用すると迅速にターゲットを捕捉できることが分かった。

本稿では、モードSネットワークの概要と機能を述べ、ネットワーク化によるモードSの性能向上について説明する。そして、ターゲット捕捉時間に関してモードSをネットワーク化して運用した場合と独立に運用した場合とで比較した性能評価結果を示す。

2. モードSネットワークの概要

図1にモードSネットワークの構成を示す。モードSネットワークは、モードSセンサ(以下、センサという)、地上データリンク処理装置(GDLP)、航空機に搭載されるモードSトランスポンダおよび機上データリンク処理装置(ADLP)により構成され、管制施設やATNルータ等に接続される。モードSは、重複覆域を持つセンサ間をネットワークを用いて管理および調整することで、電波伝搬上の制約を超えた一つの大きな覆域を形成して、フルーツ干渉を軽減する協調的かつ連続的な航空機監視、効率的な空地データ通信、相互バックアップによる信頼性の向上等、より高度な運用を提供することができる。

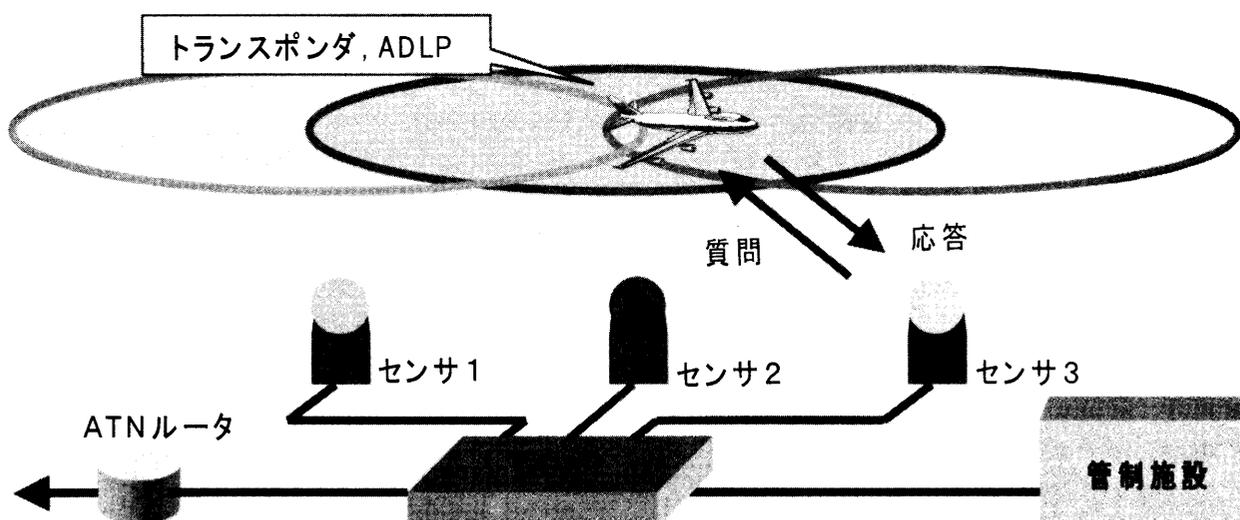


図1 モードSネットワークの構成

3. モードSネットワークの機能

以下にモードSネットワークで実行される機能の概要を示す。当所では機能評価試験において、これらの諸機能が正常に動作することを確認した⁽⁶⁾。

(1) 協調的な航空機監視

① センサプライオリティ管理

エリア毎のセンサ優先順位に基づき、各ターゲットに対して監視およびデータリンクを行うセンサを管理する。

② 航空機情報移送

ターゲットが覆域境界を通過する場合、航空機情報を転送することによりハンドオフを行い、監視を連続的に継続する。

③ 航空機情報補完

コースト発生時に航空機情報を転送し、コースト機の再捕捉をバックアップする。

(2) 効率的な空地データ通信

① アップリンク

各センサから送られてくる割り当てセンサ情報に基づいてルート情報を管理し、アップリンクの転送ルートを決める。

② ダウンリンク

地上側から転送されたルート情報を管理し、ルート情報に従ってダウンリンクの転送ルートを決める。

③ 送信センサの切り替え

アップリンクまたはダウンリンクの送信が失敗した場合、ルート情報に基づいて転送ルートを変更する。

④ モードS固有サービス

航空管制用に設計された3種類のサービス（地上喚起ダウンリンク、ブロードキャスト、モードS固有プロトコル）をサポートする。

(3) 相互バックアップによる信頼性の向上

① センサ障害発生時の処理

ネットワークを構成するセンサに障害が発生した場合、隣接センサがサービス覆域を拡大して監視およびデータ通信を代行する。

② センサ障害復旧時の処理

障害センサが復旧した場合、隣接センサが航

空機情報を転送することにより、復旧センサの運用再開をバックアップする。

③ 運用モード管理

データ通信回線に障害が発生してネットワーク運用が行えない場合、センサの運用モードを切り替えて監視を継続する。

4. ネットワーク化によるモードSの性能向上

現用SSRでは応答信号の干渉やシステム飽和が問題となっているが、モードSでは航空機に対して個別に質問を行うことにより、これらの問題点の解決を図っている。この個別質問を行うには航空機の位置およびアドレスを前もって知る必要があるため、モードSでは個別質問に先立ち、一括質問により航空機を初期捕捉して、航空機の位置およびアドレスを得ている。

モードSをネットワーク化した場合、一括質問により初期捕捉することなしに個別質問が行えるよう、他のセンサからネットワークを経由して位置およびアドレスが含まれた航空機情報が転送される。このため、ネットワーク化を図ると航空機を迅速に捕捉できるようになる。

一括質問により航空機を初期捕捉すると、センサはその航空機が一括質問に回答しないようにトランスポンダをロックアウトする。センサが密集した空域において、各センサを独立に運用した場合（以下、独立運用とする）では、各センサが独自に一括質問して航空機を初期捕捉しロックアウトする。このため、航空機はあるセンサにロックアウトされても、他のセンサの一括質問に対して応答するので、フルーツ干渉の発生が避けられない状況となる。

一方、各センサをネットワークを用いて運用した場合（以下、ネットワーク運用とする）では航空機情報が転送されるため、一つのセンサが航空機をロックアウトすれば、ネットワークを構成する全てのセンサに対してもロックアウトされるように設定できる。このため、不要な一括質問応答が発生せずフルーツ干渉を軽減できる。以下に、ネットワーク運用における覆域進入時、コースト発生時、センサ復旧時の捕捉シーケンスを示す。

(1) 覆域進入時の捕捉

あるセンサ(前センサ)の覆域を飛行するターゲットが隣接するセンサ(新センサ)との重複覆域に進入する場合、前センサから新センサに当該ターゲットの航空機情報が移送される。新センサでは移送された航空機情報をもとに個別質問を開始するので、センサ間のハンドオフにおいて監視を連続的に継続できる。

図2にターゲットが新センサの覆域に接近してから個別質問状態に移るまでの捕捉シーケンスを示す。新センサの覆域にターゲットが接近していることが前センサにより検知されると、GDL Pは前センサに対して航空機情報の転送を要求する。前センサから新センサに対して航空機情報が転送されると、新センサはGDL Pに対して外部補完状態となったことを通知するとともに、移送された航空機情報をもとにターゲットに対して個別質問を行う。ターゲットが新センサの覆域に進入し、新センサがターゲットから個別質問応答を受信すると、新センサはGDL Pに対して個別質問状態となったことを通知する。通知を受けたGDL Pは前センサに対して航空機情報の転送中止を指示する。

ネットワーク運用では覆域進入後、1 スキャン以内、遅くとも2 スキャン以内には個別質問状態となる。一方、独立運用では、一括質問応答を2 スキャン連続して受信した後に最初の個別質問を送信するので、覆域進入後、2 スキャンから3 スキャンの間に個別質問状態となる。

(2) コースト発生時の再捕捉

重複覆域を飛行するターゲットがコースト状態になった場合、コースト機の再捕捉をバックアップするために当該ターゲットを監視する隣接センサからコーストが発生したセンサ(コーストセンサ)に対して航空機情報が補完される。

図3に、センサにコーストが発生してから、コースト回復後に個別質問状態に移るまでの捕捉シーケンスを示す。コースト発生のお知らせを受けたGDL Pは当該ターゲットを監視する隣接センサに対して航空機情報の転送を要求する。隣接センサからコーストセンサに航空機情報が転送されると、コーストセンサは補完された航空機情報をもとにコーストターゲットに対して個別質問を行う。コーストセンサが当該ターゲットより個別質問応答を受けコースト状態が回復すると、GDL Pに対して個別質問状態となったことを通知する。

ネットワーク運用ではコースト回復後、1 スキャン以内、遅くとも2 スキャン以内には個別質問状態となる。独立運用では、一括質問による通常の初期捕捉によりターゲットを再捕捉する。

(3) センサ復旧時の捕捉

センサに障害が発生した場合、隣接センサが覆域を拡大して、障害センサの覆域における監視とデータ通信を代行する。また、障害センサが復旧した場合、GDL Pを経由して航空機情

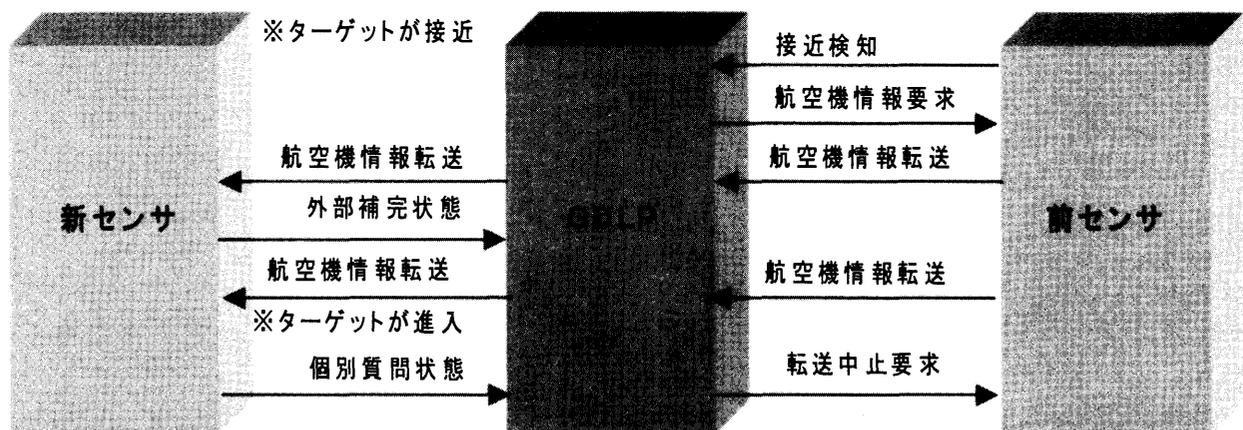


図2 覆域進入時の捕捉シーケンス

報が転送され、復旧センサのターゲット捕捉を支援する。このように、ネットワーク運用ではセンサ間で相互にバックアップすることで、信頼性の高い運用を提供できる。

図4にセンサが復旧してから覆域内のターゲットが個別質問状態に移るまでの捕捉シーケンスを示す。復旧通知を受けたGDL Pは隣接センサに対してセンサ復旧を通知する。隣接センサは復旧センサ覆域で監視中のターゲットがあることをGDL Pに通知する。GDL Pが隣接センサに対して各ターゲットの航空機情報の転送を要求し、隣接センサから復旧センサに対し

て航空機情報が転送されると、復旧センサは転送された航空機情報をもとに各ターゲットに対して個別質問を行う。復旧センサがターゲットから個別質問応答を受けると、GDL Pに対して個別質問状態となったことを通知する。

独立運用では、センサ復旧後は一括質問による通常の初期捕捉方法により全てのターゲットを捕捉するので、相当数の一括質問応答が同時に発生するが、ネットワーク運用では、一括質問応答を発生させることなく、転送された航空機情報をもとにターゲットに対して個別質問を開始できる。

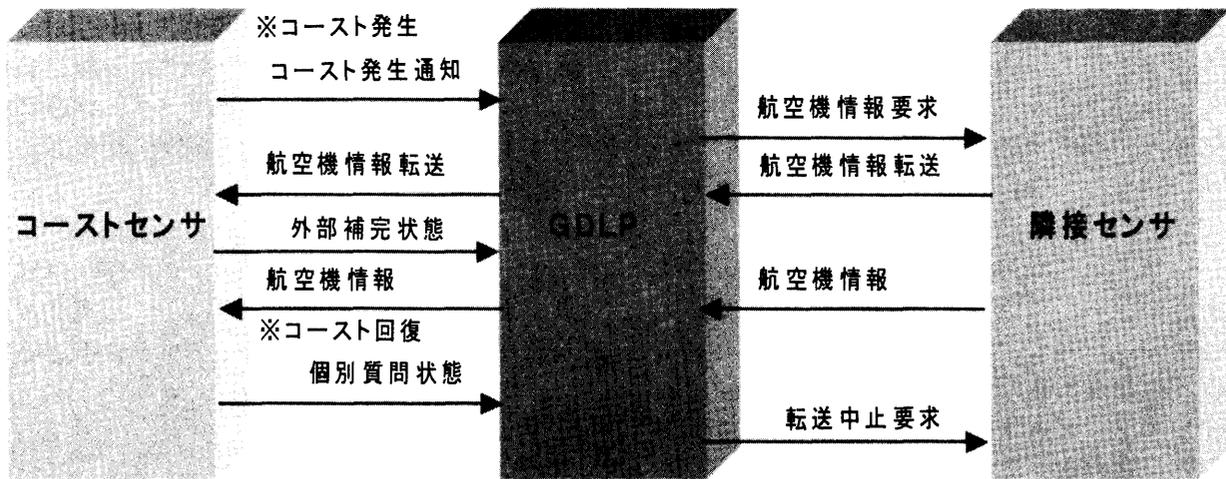


図3 コースト発生時の再捕捉シーケンス

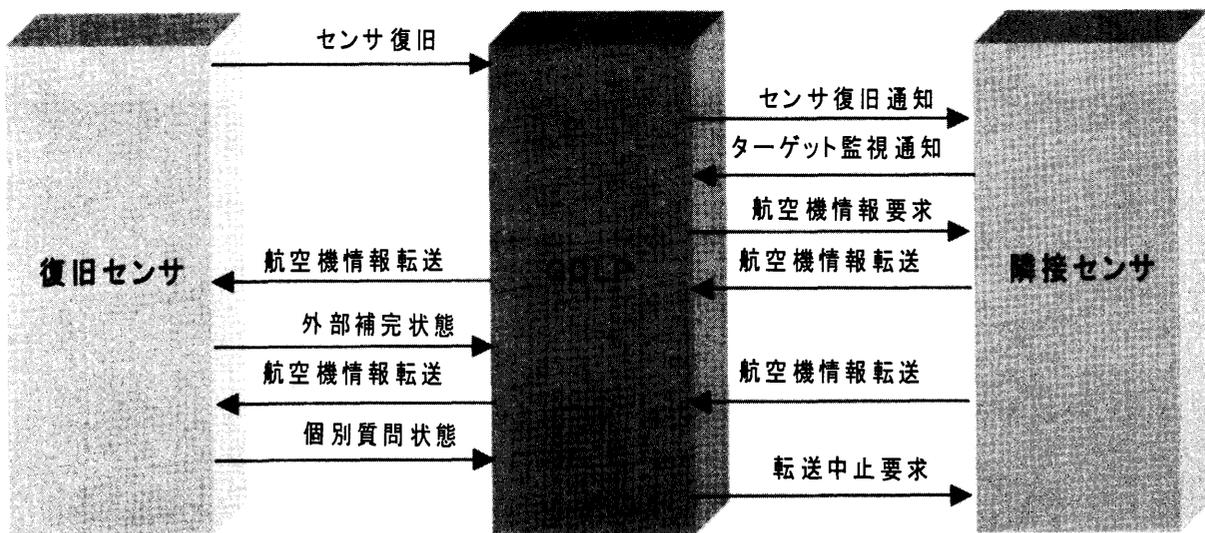


図4 センサ復旧時の捕捉シーケンス

5. 評価試験

5.1 評価システム

図5にモードSネットワーク評価システムの構成を示す。本評価システムではモードSセンサの他、複数センサの機能を模擬する擬似センサを用いてマルチサイト環境を形成させている。ネットワークの管理については、覆域の管理に関する機能はモードSセンサが実行し、センサ間の調整に関する機能はGDL Pが実行する。ターゲット相関装置は複数センサから送られてくる監視情報を共通のレーダ画面に表示させるために監視データの座標変換を行う。マルチサイトターゲットシミュレータはモードSターゲットの発生やADLP機能の模擬を実行する。本評価システムを用いてシミュレーションによる評価試験を実施した。

5.2 試験内容

性能試験は、覆域進入時、コースト発生時、センサ復旧時の捕捉時間について、ネットワーク運用の場合と単独運用の場合とで比較した。試験では、センサ性能の最も厳しい条件下で評価するために、スキャン周期は4秒、最大覆域は200NMに設定した。

以下に各試験項目における評価方法の概要を示す。なお、平成13年度第1回電子航法研究所発表会講演概要(p.58)において、コースト発生時の再捕捉時間、センサ復旧時の捕捉時間の性能試験結果を記述したが、その後にプロトコルと照らし合わせてデータ解析を進めたところ、以前の時間測定方法では正確な評価値が得

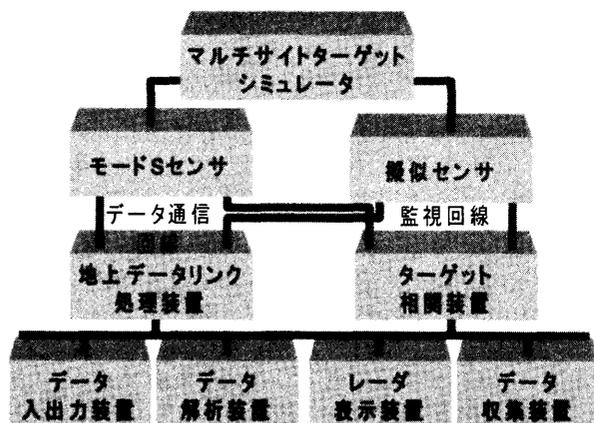


図5 ネットワーク評価システムの構成

られないことが判明した。このため、今回の試験では、正確な評価値が得られる時間測定方法に改めて実施した。

(1) 覆域進入時の捕捉時間

覆域進入時の捕捉時間の評価では、ターゲットを擬似センサの単体覆域からモードSセンサとの重複覆域に向けて飛行させ、ターゲットが重複覆域に進入してから個別質問状態になるまでの時間を比較した。

(2) コースト発生時の再捕捉時間

コースト発生時の再捕捉時間の評価では、モードSセンサにコースト機を発生させ、コースト状態が回復してから個別質問状態になるまでの時間を比較した。

(3) センサ復旧時の捕捉時間

センサ復旧時の捕捉時間の評価では、モードSセンサに障害を発生させ、障害が回復してから各ターゲットが個別質問状態になるまでの時間を比較した。ターゲットは一様に分布させた。

5.3 試験結果

(1) 覆域進入時の捕捉時間

表1に覆域進入時の捕捉時間の試験結果を示す。対象機数は72機である。覆域に進入してから個別質問状態になるまでの平均時間は、ネットワーク運用の場合では3.50秒、単独運用の場合では13.8秒であった。これより、モードSをネットワークを用いて運用した場合、覆域進入時に迅速にターゲットを捕捉できることが分かる。

(2) コースト発生時の再捕捉時間

表2にコースト発生時の再捕捉時間の試験結果を示す。対象機数は48機である。コーストが回復してから個別質問状態になるまでの平均時間は、ネットワーク運用の場合では3.52秒、

表1 覆域進入時の捕捉時間

運用モード	総機数	最小値	最大値	平均値
ネットワーク	72機	1.51秒	5.78秒	3.46秒
独立	72機	8.74秒	16.5秒	13.8秒

独立場合では 11.1 秒であった。これより、モードSをネットワークを用いて運用した場合、コスト発生時に迅速にターゲットを再捕捉できることが分かる。

(3) センサ復旧時の捕捉時間

表3にセンサ復旧時の捕捉時間の試験結果を示す。対象機数は96機である。センサが復旧してから各ターゲットが個別質問状態になるまでの平均時間は、ネットワーク運用の場合では13.4秒、独立運用の場合では11.4秒であり、ネットワーク運用の場合のほうがターゲットの捕捉が遅れる結果となった。ネットワーク運用

表2 コスト発生時の再捕捉時間

運用モード	総機数	最小値	最大値	平均値
ネットワーク	48機	1.59秒	5.41秒	3.52秒
独立	48機	9.79秒	12.7秒	11.1秒

表3 センサ復旧時の捕捉時間

運用モード	総機数	最小値	最大値	平均値
ネットワーク	96機	10.6秒	15.8秒	13.4秒
独立	96機	9.40秒	13.8秒	11.4秒

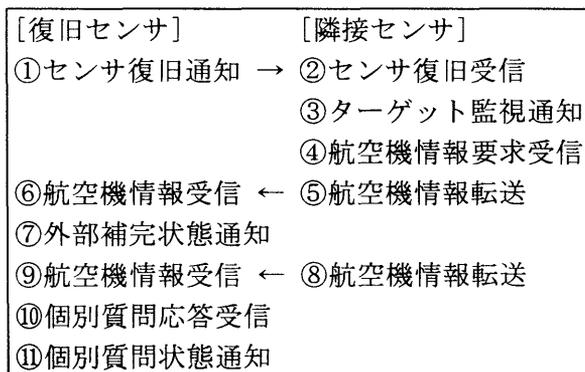
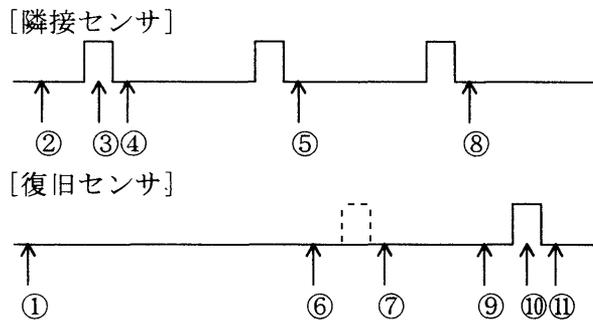


図6 捕捉処理のアルゴリズム

において先の2つの試験項目に比べて捕捉時間が約10秒長くなるのは、覆域進入時およびコスト発生時では前もって航空機情報が転送されるが、センサ復旧時では、復旧後に航空機情報転送の手続きが行われるためである。

図6にネットワーク運用における捕捉処理のアルゴリズムを示す。ネットワーク運用では、センサ復旧が通知されてから航空機情報の転送が開始されるまで1スキャン以上費やされている。加えて、航空機情報を受信してから個別質問応答を受信するまでにも1スキャン以上費やされており、現在のアルゴリズムでは効率的に処理が行われていないことが分かった。これら航空機情報の転送処理手順を改良することにより、センサ復旧時においても、迅速にターゲットを捕捉できると考えられる。

6. まとめ

本稿では、SSRモードSネットワークの概要等を述べ、ネットワーク化によるモードSの性能向上について説明し、電子航法研究所が行ったモードSネットワークの性能評価結果を示した。評価の結果、モードSはネットワーク化することにより、覆域進入時およびコスト発生時に連続的に監視を継続できることに加え、迅速にターゲットを捕捉できることが分かった。また、センサ復旧時の捕捉処理では効率的に処理が行われていないため、迅速にターゲットを捕捉するための改善策を明らかにした。

[参考文献]

- (1) ICAO: Aeronautical Telecommunications Annex10 Volume4, 1998
- (2) ICAO: Manual of The Secondary Surveillance Radar (SSR) Systems, Doc 9684, 1998
- (3) 三吉襄、宮崎裕己、古賀禎：SSRモードSシステムの研究その1 モードSシステムの開発と監視機能の評価試験について、要望研究報告、平成12年9月
- (4) 古賀禎、三吉襄、宮崎裕己：SSRモードSシステムの研究その2 データリンク機能とその評価試験について、要望研究報告、平成13年2月
- (5) 宮崎裕己、三吉襄、古賀禎：SSRモードSネットワークの開発について、第31回電子航法研究所研究発表会講演概要、平成11年6月、pp.29-32
- (6) 宮崎裕己、三吉襄、古賀禎：SSRモードSネットワークの評価試験について、第1回電子航法研究所研究発表会講演概要、平成13年6月、pp.51-58