

26 GHz 帯車載 UWB(Ultra Wide-Band)レーダの開発

Development of 26 GHz-Band UWB Radar for Automobile

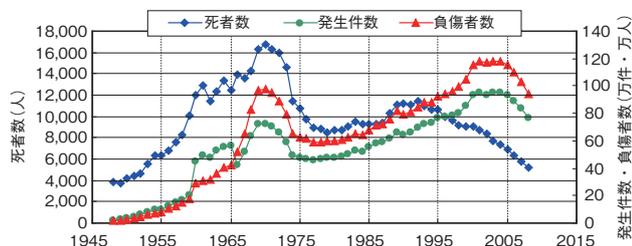
高橋 慶*
Kei Takahashi

青柳 靖*
Yasushi Aoyagi

概要 2002年2月14日の米国FCC(federal communications commission)による規制緩和をきっかけとして、超広帯域(UWB:ultra wide-band)無線システムの検討が通信・ITS(intelligent transport systems)などの分野で盛んに行われている。ITS分野でのUWB技術応用として、車両周辺監視センサに適用する、準ミリ波帯(24 GHz~29 GHz)を用いる車載用近距離監視レーダ(SRR:short-range radar)が検討されている¹⁾。当社は、世界各国の電波規制に適合させるため、レーダ搬送波の漏洩信号(以降キャリアーク)を大幅に低減した、26 GHz帯車載UWBレーダを開発した。車両バンパ内に搭載可能な小型サイズに抑えつつ、UWB技術の特徴を生かし、距離分解能15 cm以下の検出性能を実現している。また、開発品に対して総務省より無線実験試験局免許を取得したことにより、本レーダを実車へ搭載し、走行しながら電波伝搬・検出性能などの評価実験を行うことが可能となった。本稿では、UWBレーダの法制化状況、開発したレーダの詳細について報告する。

1. はじめに

現在、世界各国で、カーメーカ、部品メーカが総力を挙げて交通事故死傷者数を減少させるための安全技術開発を推進している。日本では図1に示すように、受動安全技術(衝突安全技術:エアバッグ、シートベルトなど)の普及により交通事故の死者数は減少傾向にある。しかし、交通事故発生件数や負傷者数は依然高い水準にあり²⁾、事故を未然に防ぐ能動安全技術(予防安全技術:プリクラッシュシステム、レーンチェンジアシスト、死角検知、ABS(anti-lock brake system)など)への期待が高まっている。



注1 1959年までは、軽微な被害事故(8日未満の負傷、2万円以下の物的損害)は含まない。
注2 1965年までの件数は、物損事故を含む。
注3 1971年までは沖縄県を含まない。

図1 交通事故発生件数の推移²⁾
Transition of the number of traffic accidents.

この能動安全技術を実現するためには、人や車両に衝突する危険を未然に察知するための車両周辺監視センサが重要である³⁾。車両周辺監視センサは電波式、光学式、音波式、カメラなど多種のセンサが存在する。こうした各種センサの特徴を表1に示す。UWBレーダは、極近距離から30 m程度の範囲を高い分解能でセンシングできるため、能動安全技術への応用の他にも駐車支援・渋滞時の追従走行などへの応用も期待されている。

表1 車両周辺監視センサ
Monitoring sensors for automobile surroundings.

性能/方式	UWBレーダ	ミリ波レーダ	レーザレーダ	超音波センサ	カメラ	赤外線カメラ
極近距離検出(~2 m)	○	△	△	○	○	○
近・中距離検出(~30 m)	○	○	○	×	○	○
遠距離(~150 m)	×	○	○	×	×	○
距離分解能(30 cm未満)	○	×	○	×	×	×
角度検出範囲(±30°以上)	○	×	×	△	○	○
相対速度直接検出	○	○	×	×	×	×
耐天候性(霧・雨)	○	○	×	×	×	○
夜間(暗闇での検出)	○	○	○	○	×	○

○:適している, △:利用可能, ×:利用不可能

注1:本比較表は1例です。
注2:UWBレーダは当社開発品の性能をベースとしています。

本稿では、26 GHz帯の電波行政における位置付けを紹介する。更に、当社が開発したレーダの測距、測角、相対速度測定 の原理及び構成について説明し、送信波のスペクトラム、測距、測角、相対速度測定、及び車載状態での評価結果について報告する。

* 研究開発本部 自動車電装技術研究所 高周波技術センター

2. 26 GHz帯UWBレーダの位置づけと法規制の動向

当社が開発をすすめた26 GHz帯は世界(日, 米, 欧)で長期に運用されるUWBレーダの共通帯域となりつつある。しかし, これらの規制内容は地域により若干異なっている。例えば, 欧米は放射レベルを基礎としているが, 日本はアンテナを含まない利得での規制(空中線端子規定)が前提となっている。このようななか, 当社は国内法制化活動に参画し, 技術基準の構築に貢献しつつ, 技術開発を進めた。結果として, 各種規制の理解を深めるとともに, いずれの地域においても運用可能なレーダを開発することができた。本章ではこの26 GHz帯を中心に各国の法制化動向を紹介する。

2.1 欧米

米国においては, 1998年, FCCがUWBの法制化に着手し, 現状2つの規制が制定されている。24 GHz帯は仰角方向の輻射レベルの規制値が2013年迄に段階的に厳しくなる。26 GHz帯は永続的に普及率の制限無しに利用可能な帯域として位置づけられている。表2にこれらの規制を示す。

表2 米国の法規制
Radio regulation in USA.

周波数帯	24 GHz帯 22 GHz ~ 29 GHz (1st Report and Order)	26 GHz帯 23.12 GHz ~ 29 GHz (2nd Report and Order)
導入時期	2002年2月	2004年12月
平均電力(EIRP)	- 41.3 dBm/MHz 以下	←
尖頭電力(EIRP)	0 dBm/50MHz 以下	←
用途	車載レーダ	←
使用期限	なし	なし
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射禁止帯(23.6 GHz ~ 24.0 GHz)における仰角方向輻射レベル制限あり。 ・ UWB無線局を規定するSubpart Fに規定。 ・ 中心周波数及び最高出力周波数は, 24.075 GHz以上。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 一般の免許不要局を規定するSection 15.252に規定。 ・ 23.6 GHz ~ 24 GHz帯における電波発射は - 61.3 dBm/MHz以下。 ・ 仰角方向の輻射レベル制限規定はない。

欧州においては2003年9月15日に欧州議会で提唱されたe-Safety構想SEC(2003)963に対応して法制化が開始された。現状, 79 GHz帯と24 GHz帯の2つの規制が制定されている。24 GHz帯は2013年6月迄の使用期限が定められている。26 GHz帯は審議中であり, 2010年3月に米国FCC04-285とほぼ同様の法制化がなされる予定である。表3に欧州の法規制の概要を示す。なお, 26 GHz帯の規制値については, 審議中のため, 想定される条件を記載した。

表3 欧州法規制
Radio regulation in Europe.

周波数帯	79 GHz帯 77 GHz ~ 81 GHz	24 Hz帯 22 GHz ~ 26.65 GHz	26 GHz帯(想定) 24.25 GHz ~ 29 GHz
導入時期	2004年7月	2005年1月	2010年(予定)
平均電力(EIRP)	- 3 dBm/MHz 以下	- 41.3 dBm/MHz 以下	- 41.3 dBm/MHz 以下
尖頭電力(EIRP)	55 dBm 以下	0 dBm/50 MHz 以下	←
用途	車載レーダ	←	←
使用期限	なし	2013年6月	なし
特記事項	特になし	<ul style="list-style-type: none"> ・ 放射禁止帯(23.6 GHz ~ 24.0 GHz)における仰角方向輻射レベル制限あり。 ・ 電波天文台近傍でのレーダ自動オフ機能を搭載すること。 ・ 普及率7%制限。 	特になし

2.2 日本

日本の法制化活動は2006年12月末に総務省情報通信審議会情報通信技術分科会UWB無線システム委員会に設置されたレーダ作業班において開始され, 準ミリ波帯についての審議を開始した³⁾。2007年4月に実施された, 総務省による一般からの意見の聴き取りにおいて, 意見を主張した被干渉システム毎に個別の会合が組織され(アドホック干渉検討), UWBレーダの法制化の推進側事業者(以下, 推進側)が提唱する干渉検討モデル, 計算結果に基づく論議を交わしてきた。2009年9月に干渉検討を完了し, 2010年3月をめどに省令改正手続きが実施されており, 早ければ4月からレーダの運用が可能となる。24 GHz帯と26 GHz帯の規定が制定され, 24 GHz帯には2016年12月迄の使用期限が定められる予定である⁴⁾。概要を表4に示す。

表4 我が国における法規制
Radio regulation in Japan.

周波数帯	24 GHz帯 22 GHz ~ 24.25 GHz	26 GHz帯 24.25 GHz ~ 29 GHz
導入時期	2010年4月(予定)	2010年4月(予定)
平均電力(EIRP)	- 41.3 dBm/MHz 以下	- 41.3 dBm/MHz 以下
尖頭電力(EIRP)	0 dBm/50 MHz 以下	←
用途	車載レーダ	←
使用期限	2016年12月	なし
特記事項	<ul style="list-style-type: none"> ・ 許容普及率0.1%。導入台数を継続的に把握するための自主管理グループを設置。 ・ 関連電波天文台付近では, 使用禁止エリアを設定する。 ・ 放射禁止帯(23.6 GHz ~ 24.0 GHz)における仰角方向輻射レベル制限あり。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 普及率7%を越える前(2022年目処)に干渉緩和対策が必要(具体的な干渉緩和対策方法は2018年を目処に確定)。

EIRP規制値はアンテナ利得を0 dBiとした場合であり, 実際には放射計測系ではなく, 空中線端子規定が前提となっている。その他, 以下のような対応も必要となっている。

- 将来、被干渉システムの運用条件が変更された場合や新規被干渉システムが出現した場合に迅速に干渉検討を実施して適切な対策を講じる。
- 干渉検討時に予想されなかった干渉が発生した場合には、事業者が主体となって問題の解決にあたる。

なお、我が国においては、ミリ波UWBレーダは「高分解能レーダ」と称され、専用の周波数帯が割り当てられる予定であり、準ミリ波帯とは別に法制化の議論が行われている。

2.3 その他の国

現在、全世界の約60ヶ国でUWBレーダの利用が認められている。24 GHz帯はカナダ、シンガポール、CEPTに加盟する国々(スイス、ロシアなど)及び、南アフリカ、オーストラリア、メキシコで認可されている。更に、79 GHz帯についての認可がシンガポールで追加された。26 GHz帯についても、24 GHz帯と同様に日米欧の規制に倣い、各国でこれから審議が行われ永続的に利用可能な帯域として認可されていくと思われる。

3. 開発したUWBレーダの詳細

3.1 測距方式

レーダの測距方式はTOF (time of flight) 方式を採用している。図2に示すようにTOF方式とはレーダから送信波を放出し、送信パルスがターゲットに反射し、レーダに受信されるまでの時間から距離測定を行う。距離R(m)はその伝搬時間T(s)と光速c(m/s)(=2.998 × 10⁸)を使って、以下の式で与えられる。

$$R = \frac{cT}{2} \text{ (m)}$$

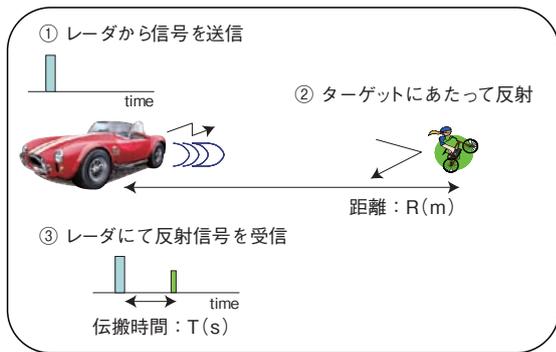


図2 TOF方式 Principle of TOF.

ここでUWBレーダは超短パルスを放出するレーダであるため、電波をτの間だけ発射した場合、距離分解能ΔLは次式で与えられる。

$$\Delta L = \frac{c\tau}{2} \text{ (m)}$$

近距離レーダは15 cm程度の距離分解能が求められるが、距離分解能を高めるためにはより狭いパルス幅の信号を発射する必要がある。この信号を伝送するために必要な周波数帯域幅W(Hz)は以下の式で与えられる。

$$W = \frac{2}{\tau} \text{ (Hz)}$$

ΔL=0.15(m)とすると、τ=1(ns)となり、W=2(GHz)となる。すなわち、数百MHz～数GHzに亘る超広帯域な周波数帯域を使用するため高精度なレーダを構成する場合はUWBでなければならない⁵⁾。

3.2 測角方式

測角方式としては位相比較モノパルス方式をベースとしたΣ(和パターン)、Δ(差パターン)信号切り替え方式を採用している。位相比較モノパルス方式とは二つの異なるアンテナパターンを用い、各アンテナで受信される信号の位相差を検出し、角度に変換する方式である。モノパルス方式は並列で信号処理すべきであるが、今回は回路規模やばらつきを考慮し、時分割でパターンを切り替える制御をおこなっている。

以下、図3を用いて原理を説明する。ここでアンテナの中心角度とターゲットとの角度差θが検出したい角度となる。

本方式では、位相差は両アンテナパターンの振幅比: Σ/Δ(図中のAの値)として検出される。この振幅比に対して1対1で対応する角度変換テーブルを予め取得して角度を算出している⁶⁾。

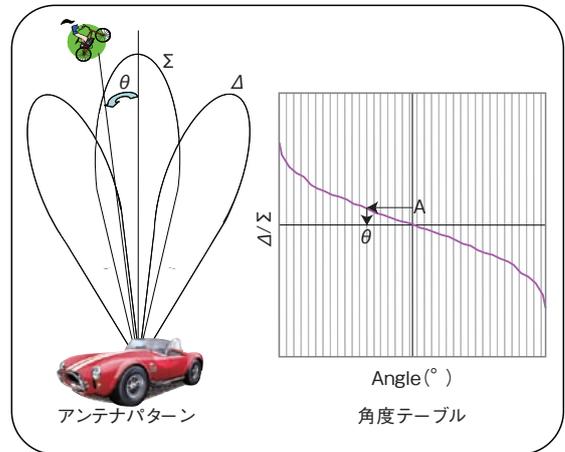


図3 位相比較モノパルス方式 Principle of phase comparison mono-pulse system.

3.3 相対速度検出方式

相対速度検出方式としてはドップラを直接検出するパルスドップラ方式を採用している。図4に示すように、相対速度を持ったターゲットを検出する場合、パルス信号がそのドップラ周波数(図内青線の正弦波)によって振幅変調された信号(実際には図赤丸に示すような受信信号の振幅値のみ)が検出される。パルス信号を連続的に発生し、受信信号の振幅値の包絡線からドップラ周波数を計測する。計測されたドップラ周波数をΔf

(Hz), 送信するパルス信号の周波数を f_0 (Hz), 光速を c (m/s) とすると, レーダとターゲット間の相対速度 v (m/s) は以下の式で表される。

$$v = \frac{\Delta f}{2f_0} \times c \text{ (m/s)}$$

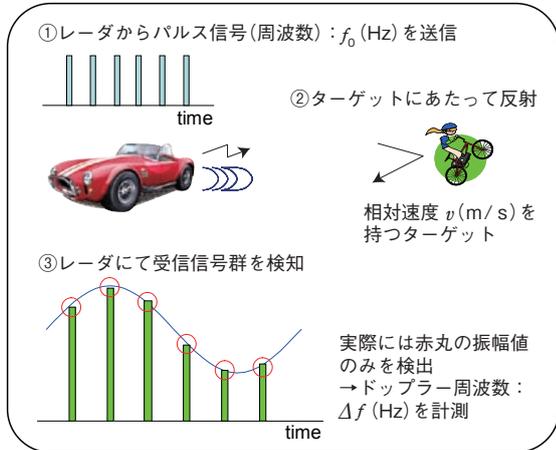


図4 相対速度検出方式
Relative velocity detection method.

3.4 レーダ構成と仕様

図5にレーダの構成図を, 本レーダの外観と仕様について図6, 表5に示す。アンテナとRF回路をモジュール化し, 制御回路も含めて車両バンパ内に搭載可能な小型サイズ(110 mm × 75 mm × 25 mm)のレーダを実現した。

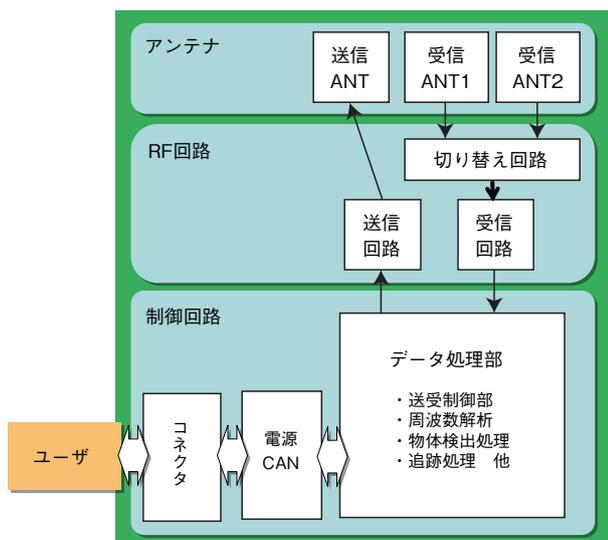


図5 レーダ構成図
Block diagram of the developed radar.



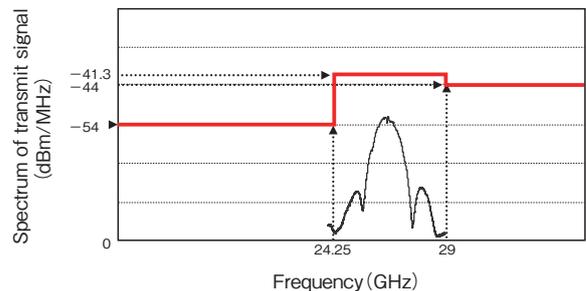
図6 レーダの外観
Appearance of the developed radar.

表5 レーダの仕様
Specifications of the radar.

項目	仕様
レーダ方式	コヒーレントパルスドップラレーダ
周波数	26 GHz帯
距離分解能	0.15 m
検知角度	± 60°
相対速度分解能	1.38 m/s
電源仕様	+8 ~ +16 VDC
通信規格	CAN及びUART(切り替え)
サイズ	110 mm × 75 mm × 25 mm ※突起部は含まず

3.5 UWBレーダ放射計測

図7に開発したUWBレーダの空中線端子電力測定結果を示す。国内で法制化が予定されている規制値(図7内赤線)を超えていないことが分かる。さらに, 本レーダは, キャリアリークが全く発生していないことも確認できる。



注: 使用する送信アンテナの最大利得は9 dBを想定。

図7 送信波のスペクトラム
Spectrum of transmit pulse.

表6, 図8, 図9, 図10に, 距離, 角度, 相対速度の測定条件と測定結果を示す。

表6 ターゲット測定条件
Conditions of target detection.

項目	距離測定	角度測定	相対速度測定
ターゲット	コーナーリフレクタ		金属ボール
	+10 dBsm	+5 dBsm	
距離	7 cm ~ 700 cm	300 cm	20 cm
角度	0°	- 60° ~ 60°	-

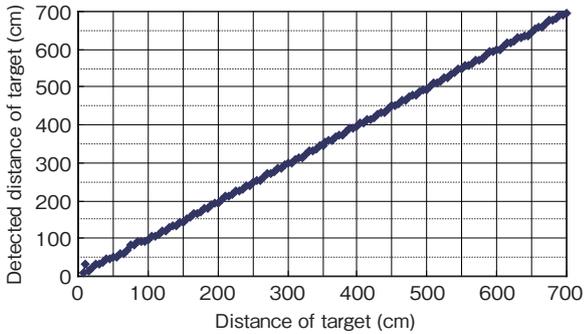


図8 測距結果
Test result of distance measurement.

図8はレーダ正面方向においたターゲットを7.5 cm刻みで移動させながら、レーダで検出した結果を示している。レーダの極近傍(7 cm)~700 cm程度の範囲で正確にターゲット検出と測距が行われている行ことが分かる。

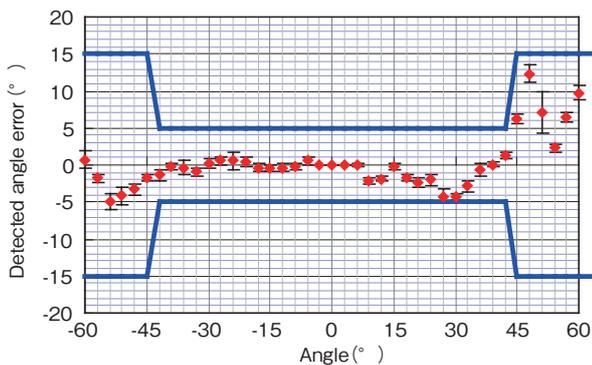


図9 測角結果
Test result of angle measurement.

図9はレーダ方向に対する測角誤差で、図内青線は本レーダの測角誤差の仕様を表している。レーダ中心から±60°の範囲で角度検出を行った場合、±45°の範囲では角度誤差±5°で、それ以上の範囲では角度誤差±15°で測角ができていることが分かる。

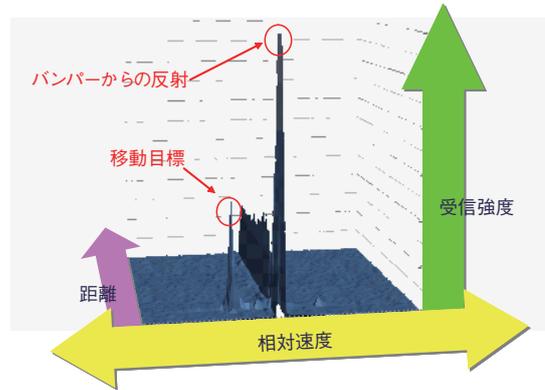


図10 相対速度検出結果
Test result of detected relative velocity.

図10はレーダを車載状態(リアバンパ内に搭載)で金属ボールの極近傍(20 cmの位置)に車両が接近した場面の評価結果となっている。金属ボールは距離20 cmに相対速度を有する物体として、バンパからの反射(距離0 cm, 相対速度0 m/s)による影響を受けず、高感度に検出されていることが分かる。

更に、車載状態でレーダ性能評価を行った結果を図11に示す。レーダが検知した物体について画面上側には上空から見たイメージ図(以下レーダチャート図)を、下側では実際の風景を表示している。レーダチャート図では1目盛りが1 mとして表示されており、図の黄丸内がレーダ取り付け位置を示す。レーダチャート図と風景図の赤四角で囲った部分是对应しており、進行方向の障害物を正確に検知できている。

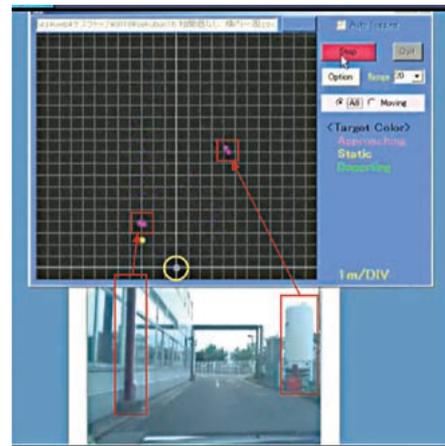


図11 車載評価結果
Test result of the UWB radar mounted to an automobile.

4. おわりに

本稿では、26 GHz帯UWBレーダの開発結果と、26 GHzを含む準ミリ波帯の電波法規制の各国の状況を紹介した。独自回路技術によりキャリアークを大幅に低減し、世界各国の電波規制に適合することに成功した。更に、開発品に対して総務省より無線実験試験局免許を取得し、実施した放射計測結果を報

告した。静止状況の評価だけでなく、本レーダを実車へ搭載し、走行しながら電波伝搬・検出性能などの評価実験を行うことが可能となった。

今後、実験を通じて取得したノウハウや検出データを活用することで、より信頼性の高い製品の開発を行い、自動車運転補助・快適性の向上や、交通事故数、負傷者の低減に貢献していきたい。

参考文献

- 1) “超広帯域(UWB)無線システムの開発,” 古河電工時報第118号, (2006)
- 2) “平成20年度中の交通事故死者数について,” 警察庁交通局資料, (2009)
- 3) “準ミリ波帯車載用近距離レーダの国内法制化動向,” IEICE technical report 108 (339) pp.49-52 20081204, (2008)
- 4) “情報通信審議会情報通信技術分科会UWB無線システム委員会報告概要(案)「UWBレーダシステムの技術的条件」について,” 情報通信審議会, (2009)
- 5) “26 GHz UWB 近距離レーダの測定技術,” 信学技報, vol. 105, no. 365, WBS2005-46, pp. 43-48, (2005)
- 6) “SSRモードSの開発と監視機能の評価試験,” SANE, 宇宙・航行エレクトロニクス 96 (205) pp.1-8 19960726, (1999)