

小型高機能 GPS 受信機の研究

Study on a New Generation Spaceborne GPS Receiver

システム誘導技術グループ

Spacecraft Guidance, Control and Dynamics Engineering Group

鈴木 秀人, 石島 義之, 山元 透, 伊藤 智夫

Hideto Suzuki, Yoshiyuki Ishijima, Toru Yamamoto, Toshio Ito

Abstract

A spaceborne GPS receiver is a very useful component which enhances the autonomy of a next generation spacecraft; consequently the requirements for receivers are getting more advanced. Moreover, because of GPS modernization, new civil signals on L2 and L5 frequency bands will be added. A new generation of spaceborne GPS receiver is studied, which can track 12 GPS satellite signals including the new L2 civil code (L2C). In this paper, the development and test results of an electrical model of a dual frequency spaceborne GPS receiver are summarized. The electrical model has 12 L1C/A and 12 L2C(C/A) channels, and is utilizing embedded dual-frequency navigation software.

1. はじめに

総合技術研究本部システム誘導技術グループでは、誘導制御機器の研究として、将来の多様なミッションに対応可能、かつ国際競争力を持つ姿勢制御システムを確立するための個々の機器の高性能化を進める研究開発を行っている。この枠組みの中で、小型高機能 GPS 受信機の研究（以下、「本研究」）は、地球観測衛星及び打ち上げロケット用として広く搭載されている GPS 受信機 (GPSR) の小型高性能化に関する研究である。本研究は、平成 11 年度より進められているもので、これまでも一連の研究成果は各プロジェクトの GPSR のフライト品開発・製作に役立てられてきている。

GPS 航法技術は低軌道衛星のオンボード航法として広く適用されるとともに GPSR の小型化・高機能化に対する要求は非常に高くなってきている。小型・高機能化のキーは高性能な電子部品の利用や最新技術・民生技術の利用が有効である。一方、GPS 近代化で GPS システムも更新される動向にある。L2C コード対応衛星(Block IIR-M)打ち上げ開始(2005 年 9 月 26 日初号機打ち上げ)、L5 帯対応衛星(Block IIF)打ち上げ開始(2007 年予定)の計画がある。そのような背景から、本研究では、最新の電子部品技術を反映し宇宙用 GPSR のハードウェア及びソフトウェア技術に関する検討を実施し、GPS 近代化にも対応した GPSR の要素技術の確立、次世代宇宙用 GPSR の開発を目指した研究を進めている。

2. 研究の概要

GPSR に対する技術は小型軽量化と同時に、多チャンネル化、捕捉時間短縮等の高機能・高性能化なども非常に大きい。多チャンネル化や捕捉時間短縮は、オンボード・リアルタイム航法の信頼性向上や運用負荷の低減につながる。また、GPS 近代化により新設される信号への対応も早急に行い、GPS システムの近代化 (アップグレード) へのフォロー・オン、それら仕様を取り込んだ将来向けの GPSR の高機能・高性能化が必要不可欠である。L2C(C/A)コードは民間用として追加される新規コードであり、これにより制約の多かった L2 帯信号の利用性向上も期待される。従来型の 2 周波 GPSR(L1C/A + L2P(Y)対応)よりも、様々な点で性能改善や利用性の向上が期待できる。

本研究は平成 11 年度の小型高機能衛星搭載用 GPS 受信機的设计検討をはじめとして研究が開始され、平成 17 年度も小型高機能 GPSR の開発や新規要素技術に関して引き続き研究が進められている。平成 12 年度から平成 14 年度にかけては、クリティカル要素技術 (高速捕捉方式、DSP による多チャンネル・多アンテナ処理実装) に関わる部分試作や試作試験を行った。本研究成果は、基幹本部関連プロジェクトのフライト品開発に反映された。平成 14 年度以降、それまでの試作成果をベースに GPS

近代化仕様を取り込みながら、次期衛星搭載用 2 周波(L1C/A,L2C(C/A)受信)タイプの GPSR の設計検討を進めた。この成果として「試作モデル」を製作し、試験評価を行った。「試作モデル」の研究成果は、次期地球観測衛星の EM 品以降の設計仕様にも取り込まれ、現在開発が進められている。

平成 16 年度は、平成 15 年度まで「試作モデル」の研究成果をベースに次期衛星搭載用 2 周波タイプの GPSR の「機能モデル」を製作・試験評価した。「試作モデル」で L2C 受信機能等そのコアとなる要素技術は、ほぼ検証された。一方で EM 品・フライト品を開発するにあたって、「試作モデル」では不十分な点を反映したものが「機能モデル」である。「機能モデル」では、目標とする開発仕様の多チャンネル、多アンテナ対応実装 (L1C/A,L2C 各 6ch×2 アンテナを L1C/A,L2C 各 12ch×2 アンテナに拡張) を反映し、最終ターゲットとなるチャンネル数・アンテナ数構成での成立性や、それが波及する機能・性能に関わる検証をするのが目的の一つでもある。さらに、本「機能モデル」を機能強化する目的で幾つかの高機能化に関する実装評価や「機能モデル」上でのデータ取得とデータのオフライン解析評価も行った。平成 16 年度の主な研究内容を Table.2 に示す。

Table.2 The Items of Study of Spaceborne GPSR in FYH16

研究項目	研究内容
(1)次世代二周波 GPS 受信機能モデルの製作	平成 15 年度までの成果である「試作モデル」に以下を反映して、「機能モデル」を完成させる。 1)L1C/A 6ch を 12ch に増設 2)L2C 相関器を L2C/A コードも受信可能に対応 3)L2C 6ch を L2 C(C/A) 12ch に増設
(2)信号処理・航法ソフトウェア機能試作・評価	(1)で製作した「機能モデル」に以下の機能を反映して、高機能化する。 1)L2C CNAV メッセージ解読機能設計、試作・評価 2)MPU リカバリ機能設計、試作・評価 3)インテグリティモニタ機能の実装評価 4)マルチパス対策機能設計検討 5)オンボード航法フィルタ精度向上検討
(3)受信機システム開発仕様見直し	(1)の「機能モデル」の製作結果及び(2)の試作・評価結果を反映して受信機システムの開発仕様の見直しを行う。

3. 成果概要

(1) 次世代 2 周波 GPS 受信機能モデルの製作

次世代 2 周波 (L2C 対応) GPSR の「機能モデル」のブロック図を Figure.1 にまとめる。平成 14 年度から進めてきた GPS 近代化対応 (L2C、L5) の信号形式や処理方式の調査研究、受信機システム概念設計結果により、次世代 GPSR としては、L1C/A、L2C(C/A)構成を今後の 2 周波タイプのベースモデルと選択した。

現行の GPSR と比較して、次世代 2 周波 GPSR の特徴は、多チャンネル化の実現 (2 周波での All-in-View) と TTFB 短縮化 (コマンド不要のコールドスタートベースの運用を前提)、近代化 GPS に対応 (2 周波目として、L2C を採用)、2 周波航法によるオンボード航法性能の改善及び対応可能な宇宙用部品での小型化と低消費電力化が挙げられる。

平成 15 年度に製作した「試作モデル」では、Figure.1 の機能ブロックに対して、チャンネル数が各周波で 6 チャンネルに制限、L2 帯が L2C/A 未対応という制約があった。そのため、「機能モデル」では、これらを取り込み 2 周波(L1C/A+L2C(C/A))、12ch、2 アンテナ構成を実現する反映を行い、フラ

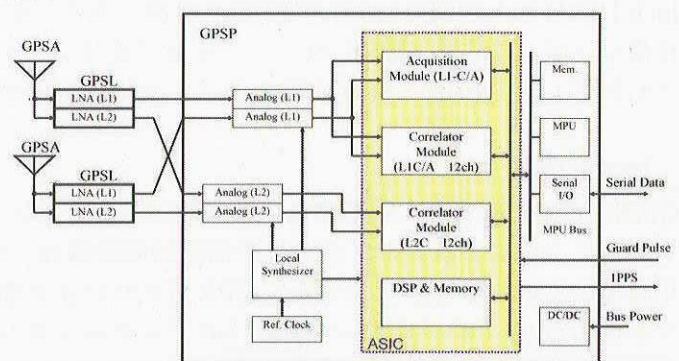


Figure.1 Block Diagram of a New Generation Dual Frequency Spaceborne GPS Receiver (S-GPSR)

イト品ターゲット目標のフルコンフィギュレーションでの動作検証を行った。Figure.2に「機能モデル」の外観を示す。FPGAの実装ロジックや組み込みソフトウェアを除いて、外観、基板、ユニットの構成は平成15年度に製作した「試作モデル」と同一である。

(2) 信号処理・航法ソフトウェア機能試作・評価

(a)L2C CNAV メッセージ解読機能設計、試作・評価

L2Cコードに重畳されている航法メッセージは、CNAVメッセージと呼ばれ、従来のL1C/Aコードに重畳されている航法メッセージ(NAVメッセージ)とは、大きく仕様も異なり、NAVメッセージに比べて幾つかの性能改善(畳み込み符号化やCRCによる

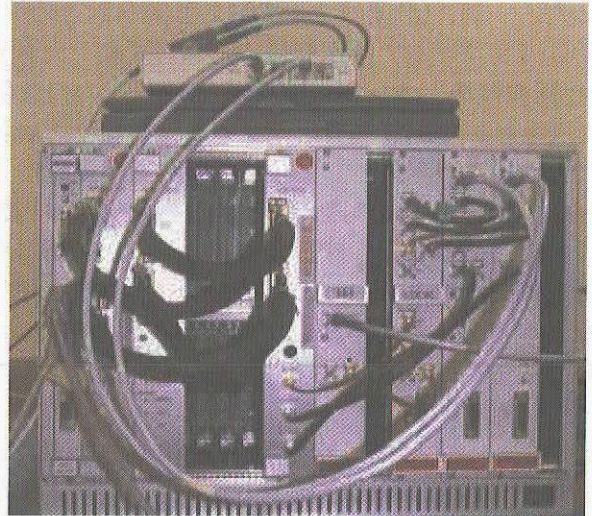


Figure.2 Picture of Dual Frequency S-GPSR Electrical Model

バースト誤り耐性、新たなデータ項目の追加)がなされている。平成16年度の研究では、CNAVの符号化方式に対応した復号処理の設計解析・試作評価を行い、その実現性を確認した。CNAVの活用(データの有効利用)は今後の課題であるが、受信しているL2C(CM)から復調したビットデータを取り込んで、CNAVメッセージを復号するまでの処理を本研究で確立した。トレードオフの結果、ビタビ(硬判定)復号方式を採用することとした。L2CNAVのビタビ復号方式における最適な設計パラメータ(トレリス長、拘束長)を確定した。メモリ量、処理時間は受信機のリソースで十分許容できる範囲であり、遅延時間は復調の遅延制約を許容できる。「機能モデル」では、その機能確認までを実施した。BER(Bit Error Rate)の性能評価は、「機能モデル」で取得したデータを用いて、オフラインでシミュレーション解析により実施した。L2C回線レベルでは問題なくBER性能を引き出せることを確認した。

(b)MPU リカバリ機能設計、試作・評価

次世代2周波(L2C対応)GPSRは、2プロセッサ構成である。プロセッサの1つは信号の同期処理(GPS信号の捕捉・追尾、復調)を担うDSPである。もう1つは、その後段で受信機の動作管理、航法メッセージの解読、航法演算、衛星選択、データの入出力処理等を行うメインのMPUである。平成15年度より衛星搭載時の信頼性や安定動作を確保(処理レベルでの放射線耐性強化)することを目的として、SEU発生時の高速リカバリ対策の試作検討を実施した。平成15年度は、DSPのリカバリ処理を検討し、「試作モデル」に組み込んで良好に動作することを確認した。平成16年度においては、もう一方のプロセッサであるMPU側のリカバリ処理を試作し、「機能モデル」に実装してこちらも良好に動作することを確認した。「機能モデル」の試験環境ではSEUは起こせないため、その発生条件を模擬(MPUに意図的な例外を発生)させることでその機能確認を行った。

通常、宇宙用GPSRは、放射線耐性のある部品で構成される。本機能は、GPSR単独で自律的に復帰すること、その復帰時間が冗長系の系切り替えなどと比べて短時間であることが特徴である。発生時における地上系での対応処置の負荷を低減する効果や異常の継続時間を短縮する効果などが挙げられる。本機能の効果的な適用例としては、部品或いは使用環境の問題でSEUの発生頻度が要求より高い場合、動作冗長(衛星では通常、待機冗長で使用)の運用を前提とする場合、あるいは、衛星のリソースの制約でGPSRの冗長構成が取れない場合等が挙げられる。

(c)インテグリティモニタ機能の実装評価

インテグリティモニタ機能は、航法に使用可能な衛星の観測量や航法結果に基づいて、異常な観測量を検出・棄却して航法データの健全性とGPSRの継続安定動作を確保する技術である。平成16年度の作業においては、「機能モデル」上で以下の(i)から(iii)に示す機能を実装して、その有効性を検証評価

した。一部、(d)項のマルチパス低減検討とオーバーラップする内容である。

(i)L1/L2 コード、搬送波の線形結合を使った観測量のチェック処理(観測量の識別)

2 周波観測、オンボードの 2 周波利用の利点を生かして、L1/L2 のコード、搬送波の線形結合を使った(主としてシュードレンジの異常の検知と棄却が目的)観測量のチェック処理である。「機能モデル」では、異常観測量として、マルチパス誤差を信号に載せることで、その機能を検証した(d)項参照)。

(ii)観測データの信号強度チェック(観測量の識別)

L1/L2 のコード、搬送波の同期レベル(信号強度)を使って異常を検知するアルゴリズムである。時間履歴でその誤差の周波数成分を検出する方式や、視野情報のマップデータベースを使って異常を検出棄却する方式もあるが、実装の実現性を考慮し、本検討では、閾値による比較のチェックまでとした。「機能モデル」では、異常観測量として、マルチパス誤差を信号に載せることで、その機能を検証した(d)項参照)。

(iii)インテグリティ最小自乗法航法の併用(航法結果の識別)

衛星搭載用 GPSR では拡張カルマンフィルタによるオンボード航法をベースとしている。このバックグラウンドで、最小二乗航法を並行動作させ、カルマンフィルタの発散や航法演算異常を検出する。本方式は厳密な RAIM(Receiver Autonomous Integrity Monitoring)とは若干異なるが、今後、バックグラウンド最小二乗航法に RAIM を採用することで、その信頼性を更に上げることも可能である。

(d)マルチパス対策機能設計検討

マルチパス誤差は受信環境に大きく依存する要因である。平成 16 年度の研究では、衛星搭載条件の受信環境でのマルチパス誤差の低減を検討の前提とした。衛星搭載環境で影響を受けるのは、太陽電池パドルや GPS アンテナ視野内の障害物(衛星間通信用のアンテナ等)が挙げられる。これらを考慮しても、その光路差は高々 10m 程度でありマルチパスもそのオーダーとなる。一般的に 100m オーダーでのマルチパスを効果的に低減する方式は多くあるが、その 10 分の 1 程度のオーダーのマルチパスを低減するのは難しい。低減対策として、信号処理の段階で低減する方式と航法前段で低減・棄却する方式がある。信号処理の段階で低減する方式として、ナローコリレーションという技術があり、これを「機能モデル」に実装して評価した。航法前段で棄却する処理としては、受信電力によるデータチェックアルゴリズム、搬送波によるシュードレンジのスムージング、2 周波のコード・搬送波の線形結合(各ワイドレーン差分)を使った観測量チェックを実装して、その効果を検証した。Table.1 に、試作の評価結果をまとめる。

Table.1 Implemented Methods and Test results on Multipath Mitigation Technique

「機能モデル」で試作した対策方式	検証結果とその評価
ナローコリレーション (信号処理による低減)	衛星搭載環境でのシュードレンジのマルチパス誤差の低減効果として有効であることを確認した。処理上も現実的であり、検討した方式の中では、実装に関する費用対効果の最もある方式である。ただし、その十分な性能を引き出すためには、実現できるサンプリング周波数の選定やベースバンド周波数の選定が必要となる。
信号強度によるデータチェックアルゴリズム(航法前段での棄却処理)	大きな(100m オーダー)のマルチパス誤差の低減には効果がある。小さい(10m オーダー)のマルチパス誤差除去にはあまり大きな効果は得られない。
シュードレンジのスムージング(航法前段での低減)	シュードレンジのマルチパス誤差のうち、高周波成分除去には効果がある。スムージング時定数が 20 秒以上では、あまり改善効果がなくなる。また、時定数の長いマルチパス誤差の低減は難しい。
2 周波のコード、搬送波の線形結合によるチェック(航法前段での棄却処理)	大きな(100m オーダー)のマルチパス誤差の低減には効果がある。小さい(10m オーダー)のマルチパス誤差に対しては、検出率が下がり、あまり大きな効果は得られない。L1 と L2 のキャリア継続ロックが前提であり、マルチパスにより、キャリアのサイクルスリップが発生すると、次にキャリアロックしたときにマルチパス誤差を検出することができないため、本データチェックは機能しなくなるデメリットがある。

(e) オンボード航法フィルタ精度向上検討

(c)項、(d)項の高機能化に関する処理を「機能モデル」に反映し、L1C/A と L2C(C/A)の 12 チャンネル構成とした「機能モデル」上でのオンボード航法性能を GPS シミュレータによる試験で評価した。6 チャンネル構成は、平成 15 年度までの「試作モデル」やこれまでの衛星搭載用 GPSR の構成である。「機能モデル」にてはじめて、12 チャンネル構成に拡張し、2 周波多チャンネル動作を実現した。Table.2 に GPS シミュレータを使った「機能モデル」の試験ケースとその結果をまとめる。Table.3 にその評価結果をまとめる。以下の観点で評価した。

- ・ 6 チャンネル構成と 12 チャンネル構成の違いによる比較
- ・ 1 周波/2 周波航法の性能比較
- ・ L2 帯の利用信号の違い (従来 : L2P(Y), 本研究 : L2C(C/A)) による比較

Table.2 Test Cases Using GPS Simulator and Navigation Accuracy Results

航法使用周波数	航法 filter	CH 数	L1/L2 電力差 [dB]	位置誤差 [m]			速度誤差 [mm/s]		
				Radial	Along-Track	Cross-Track	Radial	Along-Track	Cross-Track
1周波 (L1C/A)	EKF	12	-6	-8.45±1.40	-0.92±0.55	-0.07±0.73	-7±11	12±5	0±8
1周波 (L2C)	EKF	12	-6	-13.16±3.75	-0.92±1.81	-0.41±1.56	-10±16	17±8	0±10
1周波 (L1C/A)	LS	12	-6	-8.29±1.42	-1.01±0.50	-0.10±0.55	-6±42	-12±19	0±35
1周波 (L1C/A)	AG	12	-6	-7.83±1.72	-1.20±1.15	-0.25±1.07	-6±52	-19±32	0±41
2周波 (L1C/A, L2C)	EKF	12	-6	0.40±4.99	-0.16±1.91	-0.39±1.73	3±18	-5±10	0±10
2周波 (L1C/A, L2C)	EKF	6	-6	0.97±8.09	0.51±3.62	-1.48±2.77	6±25	-4±15	0±12
2周波 (L1C/A, L2C/A)	EKF	12	-6	-1.16±4.94	-0.94±2.47	0.46±2.02	-4±17	5±10	0±9
2周波 (L1C/A, L2C)	EKF	12	-3	-0.43±2.48	-0.12±1.08	0.15±1.06	-3±12	4±6	0±9
2周波 (L1C/A, L2C)	EKF	6	-3	-1.05±3.21	-0.18±1.22	0.40±1.02	-3±14	5±8	0±10

条件 : 電離層モデルあり, 航法 : EKF : 拡張カルマンフィルタ, LS : 最小二乗航法, AG : 最適 4 衛星航法
誤差 : 平均±1σ (標準偏差) で記載

Table.3 Evaluation Summary of the Navigation Test Results

航法機能に関わる評価	試験結果の評価
6 チャンネル構成と 12 チャンネル構成の違いによる比較	<ul style="list-style-type: none"> ・ 12 チャンネルでは、GDOP と航法精度が改善。 ・ 12 チャンネルの場合、4 チャンネル以下となる期間がない。 ・ 12 チャンネルの場合、衛星切り替え回数が減りロックオン継続時間が長くなる。
1 周波/2 周波航法の性能比較	<ul style="list-style-type: none"> ・ 1 周波航法の場合、電離層遅延により Radial 方向 (反地球向き) のバイアスが発生。これと辻褃を合わせるように推定クロックバイアスにもオフセットが発生する。 ・ 2 周波航法の場合、L1/L2 観測量による電離層遅延補正で、この Radial 方向バイアス誤差を落とせる。ただし、線形結合により、シェードレンジのランダム誤差が約 3 倍に大きくなり、航法誤差に見るランダム誤差は 1 周波航法の場合よりも、大きくなる (カルマンフィルタ航法であるにも関わらずランダム航法誤差は 2 倍)。今後の 2 周波航法の課題。 ・ 2 周波航法により、1 周波航法で見られたクロックバイアスのオフセット誤差がなくなり、およそ、1 周波航法(L1)で 28 ns 程度のオフセット誤差が、2 周波航法では 3 ns 程度に改善できる。
L2 帯の信号の違い (従来 : L2-P(Y), 本研究 : L2C(C/A)) による比較	<ul style="list-style-type: none"> ・ L2C(C/A)受信処理は単独でのサーチはせず、L1C/A からの捕捉支援によるハンドオーバーにより L2C コードを捕捉する方式を採用している。これにより L2 信号受信は、L1 C/A の捕捉時間に比べ応答が遅い。その結果、L2C(C/A)受信継続時間は L1C/A より若干短い(ハンドオーバー後の L2C コードの捕捉時間分の 10 秒以下)。 ・ 「機能モデル」では実装していないが、L2P(Y)の場合、L1 C/A がロックした後 100s ~200s かけて受信を確立する。このため L2P(Y)では、受信継続時間が短く、オンボードによる 2 周波航法の適用は難しい。しかし、L2C(C/A) では、L2P(Y)に比べると、応答が L1 C/A とほぼ同じであるためオンボードでの 2 周波利用、2 周波航法が問題なく実現できる。多チャンネル実装によりこれは、十分補完できる。

(3) 受信機システム開発仕様見直し

次世代衛星搭載用 GPSR の開発仕様の見直しを行った。Table.4 にこれをまとめる。いくつか変更点があるものの、「機能モデル」の製作・試作評価結果を反映してその確度を高めたことと、前提条件の変更（改訂されたユーザーインターフェース仕様 IS-GPS-200D の変更点の反映）によるものである。これにより次世代衛星搭載用 GPSR の開発仕様のベースを確立した。

Table.4 Designed Specifications of a New Generation Dual Frequency Spaceborne GPS Receiver

主要諸元	設計仕様・性能
受信衛星数	<ul style="list-style-type: none"> ・ L1 C/A : 12衛星以上同時受信 ・ L2C(C/A) : 12衛星以上同時受信
受信信号	<ul style="list-style-type: none"> ・ L1 C/A ・ L2C(C/A)
アンテナ数	<ul style="list-style-type: none"> ・ L1 C/A : 2アンテナ ・ L2C(C/A) : 2アンテナ
計測精度(3σ)	<ul style="list-style-type: none"> ・ シュードレンジ(L1 C/A) : 10 m 以下 ・ デルタレンジ(L1 C/A) : 15 mm 以下 ・ 搬送波位相(L1 C/A) : 10mm 以下 ・ シュードレンジ(L2C(C/A)) : 10 m 以下 ・ 搬送波位相(L2C(C/A)) : <u>18mm 以下</u> (条件 : GPSL 入力端において受信電力 L1 C/A-134dBm, L2C(C/A)-135dBm)
航法精度(2周波航法)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 位置 (RSS, 95%) : 26 m 以下(85m@GDOP≤6) ・ 速度(RSS, 95%) : <u>30 cm/s 以下</u> ・ 時刻 (RSS, 95%) : <u>100 ns 以下</u> (条件 : 1アンテナ航法時)
GPS 信号追尾条件(相対距離換算)	<ul style="list-style-type: none"> ・ 速度 : 10 km/s 以下 ・ 加速度 : 10 m/s² 以下
アンテナ覆域	<ul style="list-style-type: none"> ・ L1周波数利得 : +8 dB 以下, -4 dB 以上 (天頂から80°以内) ・ L2周波数利得 : +8 dB以下, -4 dB 以上 (天頂から<u>75°</u>以内)
TTFF	<ul style="list-style-type: none"> ・ コールドスタート : <u>40分以下</u> (参考 : 評価実力値20分) ・ ウォームスタート : <u>40分以下(平均20分以下)</u>, (参考 : 評価実力値60秒) ・ L1 C/A, L2C(C/A) 衛星切り換え : <u>270 秒以下(平均90秒以下)</u>
1PPS 基準パルス時刻精度	<u>±150ns 以内 (95%)</u> (GPS 時刻に対して)
質量・寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・ GPSP : <u>4.5 kg 以下</u>, 218mm(W)×188mm(D)×130mm(H) ・ GPSL : 0.6 kg 以下, 150mm(W)×80mm(D)×45mm(H) ・ GPSA : 1.0 kg 以下, φ 80mm(W,D)×100mm(H)
消費電力	25W 以下

(注) 下線部は平成 15 年度研究からの見直し部分

4. まとめ

L1C/A、L2C 対応の次世代宇宙用 2 周波 GPSR の「機能モデル」を製作し完成させた。本モデルは、EM 品またはフライト品とは部品レベルや機械設計、熱設計は異なるものの、電氣的にその機能は同等のモデルである。また、本モデルに信号処理・航法処理に関する試作実装を行い、高機能化に関する検討評価を行った。方式のトレードオフの結果、フライト品への採用が見送られる技術もあるが、その一部は、フライト品開発に取り込むことで GPSR の高機能化を実現できる。

平成 16 年度の研究で、幾つかの課題も確認された。2 周波航法時のランダム誤差の低減、L2CNAV メッセージの有効な利用方式の検討、実 L2C 信号による受信評価等が挙げられる。その一部は平成 17 年度の研究で計画されている。今後も、GPS 近代化や他の測位システムの最新動向、最新の電子技術に配慮しながら、宇宙用 GPS 受信機の小型高機能化を目指した研究開発を進めていきたい。

[参考文献]

Navstar GPS Space Segment / Navigation User Interface (IS-GPS-200,Rev.D), 7 December, 2004