

高性能姿勢制御システムの研究

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

石島 義之, 山元 透, 伊藤 智夫

Yoshiyuki Ishijima, Toru Yamamoto, Toshio Ito

Abstract

Spaceborne GPS receiver is a very useful component which enhances spacecraft autonomy, so the requirement for receivers is getting advanced. Moreover, in GPS modernization, new civil codes on L2 and L5 frequency bands will be added. In this study, a new generation spaceborne GPS receiver is investigated, which can track more 24 GPS satellite signals including the L2 new civil code (L2C). In this paper, the design result and target specification of a new generation dual frequency spaceborne GPS receiver, utilizing legacy L1C/A signal and new L2C signal, are summarized. Next, L2C signal acquisition and tracking correlator implementation and device's test results are shown. The functional model of a new generation dual frequency spaceborne GPS receiver, including L2C signal correlator, was designed and manufactured. Finally, several tests for spaceborne GPS receivers were conducted by GPS simulator and the target specification was validated by the evaluation of these test results.

1. はじめに

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つつあり、それに伴い GPS 受信機の小型化・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高速信号捕捉等の新規技術・民生技術の利用が有効である。また、GPS 近代化計画の中で GPS システムも更新される動向にある。2000年5月の SA 解除、L2 帯 C コード対応衛星(Block IIR-M) 打ち上げの開始(2004 年予定)、L5 帯対応衛星(Block IIF)打ち上げ開始(2006 年予定)があり、対応が必要である。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 GPS 受信機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 GPS 受信機の要素技術の確立、次世代宇宙用 GPS 受信機の開発を目指した研究を進めている。

2. 研究の概要

GPS 受信機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 L2C 信号への対応も早急に行う必要がある。L2C 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が期待される。

平成 15 年度上期は、平成 14 年度の研究成果を基に、次世代 L2C 対応 2 周波 GPS 受信機の機能モデルの設計仕様を確立し、L2C 信号捕捉・追尾部の部分試作 (FPGA 論理設計、論理シミュレーション、FPGA への実装及び単体試験) を実施した。また L2C 信号処理回路の動作確認・検証に必要なデジタル処理部単体評価用装置 (GPS デジタル信号模擬部) を製作し、これによりロジック、論理合成の設計結果の妥当性を検証した。

平成 15 年度下期は、L2C 信号捕捉・追尾部の部分試作結果を取り込み、必要となるハードウェア、ソフトウェア改修を反映して 2 周波 (L2C 対応) GPS 受信機の試作モデルを製作した。また、GPS 近代化計画の信号形式に対応した L2C 信号も発生可能な GPS シミュレータにて本受信機の試験評価を実施した。これにより、設計仕様、機能・性能要求の妥当性を検証した。

3. 成果の概要

(1) 次世代2周波(L2C対応)GPS受信機機能モデルの設計検討

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をベースに、次世代2周波(L2C対応)GPS受信機の機能モデルの設計検討を行った。既存宇宙用GPS受信機の設計仕様、近代化GPSにおける最新のL2C信号仕様及び今後想定される宇宙用部品技術レベルに基づき、次世代2周波(L2C対応)GPS受信機の機能・性能要求展開、機能配分、インターフェース設計、デジタル部設計、アナログ部設計、ソフトウェア設計に関わる具体的な設計解析を行った。これにより次世代2周波(L2C対応)GPS受信機の設計仕様を策定した。Figure.1に次世代2周波(L2C対応)GPS受信機機能モデルのブロック図をまとめる。Table.1に次世代2周波(L2C対応)GPS受信機機能モデルの設計仕様をまとめる。現行のGPS受信機と比較して、次世代2周波GPS受信機の特筆すべき点としては、多チャンネル化の実現(2周波でのAll-in-View)とTTFF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。

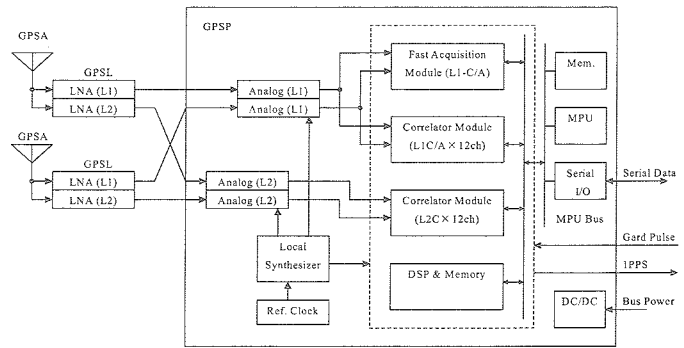


Figure.1 Block Diagram of a New Generation Dual Frequency Spaceborne GPS Receiver(S-GPSR)

Table.1 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) : 10 m 以下 ・デルタレンジ(L2C) : 15 mm 以下 ・搬送波位相(L2C) : 10mm 以下 (条件 : GPSL 入力端において受信電力 L1 C/A、L2C-134dBm)
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%) : 20 cm/s 以下 ・時刻 (RSS, 95%) : 85 ns 以下 (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 以上-4 dB 以下 (天頂から10°以内) ・L2周波数利得 : +8 dB 以上-4 dB 以下 (天頂から10°以内)
TTFF	<ul style="list-style-type: none"> ・L1 C/Aコールドスタート : 20 分以下 ・L2C ウォームスタート(オプション) : 6 分以下 ・L1 C/A 衛星切り換え : 60 秒以下 ・L2C 衛星切替え : 60 秒以下
1PPS 基準パルス時刻精度	±85ns 以内 (95%) (GPS 時刻に対して)
質量・寸法	<ul style="list-style-type: none"> ・GPSR : 4.0 kg 以下、218mm(W)×188mm(D)×110mm(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

(2) L2C 信号捕捉・追尾部の部分試作

機能モデルの設計検討結果を反映して、新規要素技術となる L2C 信号の捕捉追尾を行うデジタル処理部の部分試作 (FPGA 論理設計及び FPGA への実装) を行った。Figure.2 に L2C 信号処理部を実装したデジタルユニットを示す。部分試作では、L2C 信号受信の評価が主目的であり、L2C 受信処理回路のみを製作して L2C 信号受信に必要な機能を全て組み込んだ。ただし、平成 14 年度までの部分試作の成果の流用の観点から平成 15 年度で部分試作する L2C のチャンネル数は 6 チャンネルまでとした。

試作したデジタル回路の基本動作として、MPU(VME バス)インターフェースの確認や L2C コード生成、各種レジスタ (相関処理積算値、NCO 等) の動作確認を実施し L2C 信号処理回路の基本動作を確認した。また、L2C 信号処理部の試作結果の検証を効率的に行うための試験装置としてデジタル処理部単体評価用装置を製作した。これを Figure.3 に示す。デジタル処理部単体評価用装置は、GPS 受信機における IF 段以降の A/D 変換後の量子化信号データ列を模擬する装置 (受信機のサンプルクロックレベルでの入力信号列を模擬する装置) である。本装置を使用することにより、IF 段より上流のアナログ部 (ダウンコンバータや LNA)、RF 入力信号発生源 (GPS シミュレータ、フィールド環境等) を使用することなく、デジタル部以降 (A/D 変換以降) の相関器、DSP、MPU の構成での検証が行える利点がある。本試験装置を活用して、L1 C/A 信号の追尾確認をした上で L2C 相関器の動作試験を行った。試験装置で生成した L2C 模擬入力信号との相関が取れることを確認した。GPS 受信機の動作検証では、最終的には、LNA やアナログ部を含めたフル構成 (GPSA 除く) にて、GPS シミュレータ等による RF 信号を入力させて L2C 信号の捕捉追尾機能の検証をすることが必須である。これは (4) 項に示す試作モデルの試験評価 (GPS シミュレータを使用) で検証した。

L2C 相関器(FPGA)の回路設計を行った結果、FPGA 回路のゲート数は 365k ゲート(L2C×6ch 構成)となった。この試作結果及び過去の実績から試算するフル構成 (L1 C/A×12ch, L2 C×12ch の最終構成) でのゲート数は合計 958k ゲートとなる。これは、宇宙用 1M ゲートアレイ 1 個を若干下回るゲート規模となる。この見積りには DSP のメモリ容量の不確定分と L2 C/A コードの回路が含まれていないため、更に大きくなる可能性もある。よって、最終構成での 2 周波 GPS 受信機を実現するためには、宇宙用 1M ゲートアレイを 1 個あるいは 2 個 (ALOS/GPSR と同じ) を使用した構成になると考えられる。

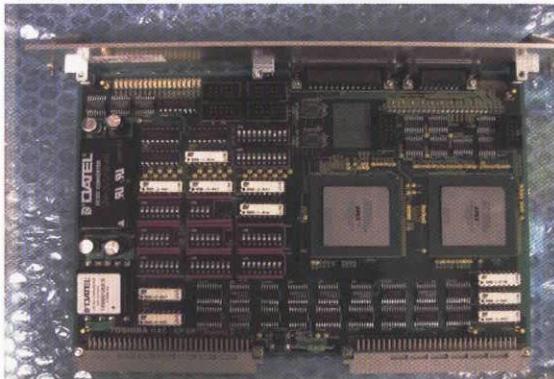


Figure.2 Digital Unit (FPGA Board)
Implemented L2C Processing Module

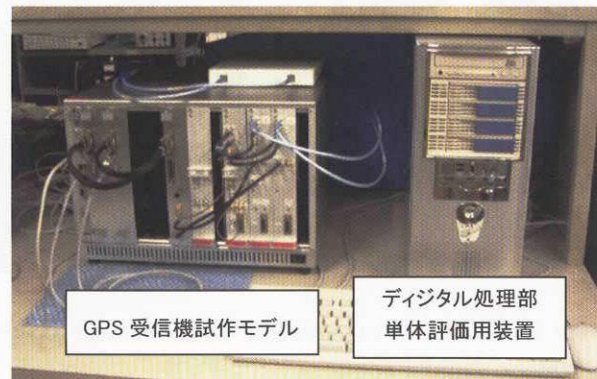


Figure.3 Functional Model including L2C
Processing Unit(Left) and GPS Digital Signal
Simulator(Right)

(3) 次世代 2 周波(L2C 対応)GPS 受信機試作モデルの製作

次世代 2 周波 GPS 受信機機能モデルの設計仕様及び L2C コードの信号捕捉・追尾部の部分試作結果をもとに、試作モデルの製作を行った。既存の 2 周波 GPS 受信機部分試作モデル(平成 14 年度までの研究・部分試作成果であり L1 C/A×6ch、L2 C/A×6ch 構成)に対して Table.2 に示す必要なハードウェア及びソフトウェアの改修を施して次世代 2 周波(L2C 対応)GPS 受信機の試作モデル (L1 C/A×6ch+L2 C×6ch 構成) を完成させた。Figure.4 及び Figure.5 に次世代 2 周波 GPS 受信機の試作モデルの概観図、機能ブロック図を示す。なお、最終ターゲットとしての 12 チャンネル化 (チャンネル数の拡張) は、平成 16 年度の研究の中で反映を予定している。

Table.2 Implemented Functions to the functional model of the New Generation S-GPSR

改修項目	改修内容	HW	SW
L2C 信号捕捉・追尾回路及び処理	L2C 捕捉追尾用回路(6ch 分)の FPGA への実装 (部分試作結果の反映)。 L1 C/A からのハンドオーバーも含め、L2C 信号を捕捉、追尾できることを確認する。本試作モデルでキーとなる研究要素技術。	✓	✓
2 周波オンボード航法	2 周波による電離層遅延補正機能、2 周波観測データによる異常観測量の検出・棄却機能、インテグリティモニタ用バックグラウンド4衛星航法機能等をインプリメントし、航法の性能及び安定性の改善をする2周波航法を実現する。本試作モデルでキーとなる研究要素技術。		✓
ガードパルス機能	レーダーの RF 干渉を避ける機能を試作モデルにも実装し、ガードパルス機能が、新規 L2C 信号についても同様に利用できることを確認する。	✓	✓
1PPS 機能	1PPS の時刻同期パルスの出力機能を試作モデルにも実装し 1PPS 出力されることを確認する (時刻制御機能は 2 周波航法をベース)。	✓	✓
2 アンテナ選択処理	試作モデルでは、ハードウェアの制約上アナログ系は 1 アンテナ構成であるが、デジタル系以降にて 2 アンテナ構成として、姿勢条件を考慮したアンテナを選択・受信する機能をインプリメントする。	✓	✓
高速リカバリ機能 (SEU 対策)	試作の特徴である DSP 部分の衛星搭載用へのフェージビリティ検討の一環として、DSP の SEU を想定した高速リカバリ機能を検討し、実際に試作モデルにインプリメントする。擬似的に SEU を模擬して高速に復帰することを確認する。		✓

注) HW : ハードウェアへの反映, SW : ソフトウェア (または DSP) への反映

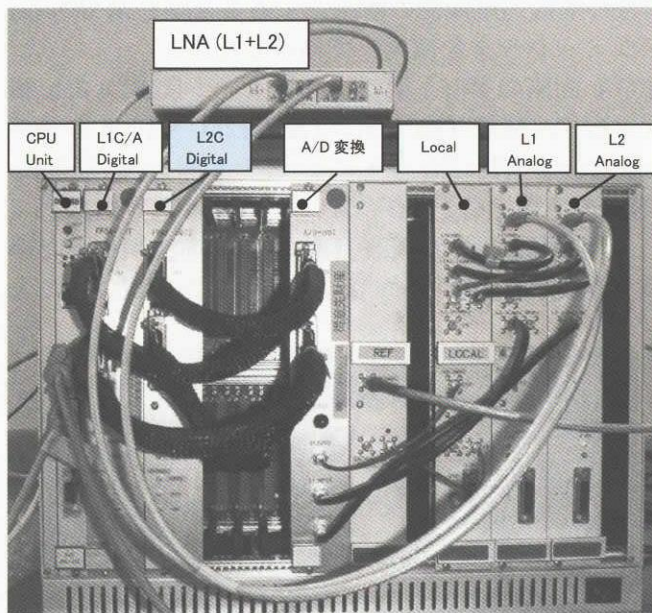


Figure.4 The Functional Model of the New Generation Dual Frequency S-GPSR

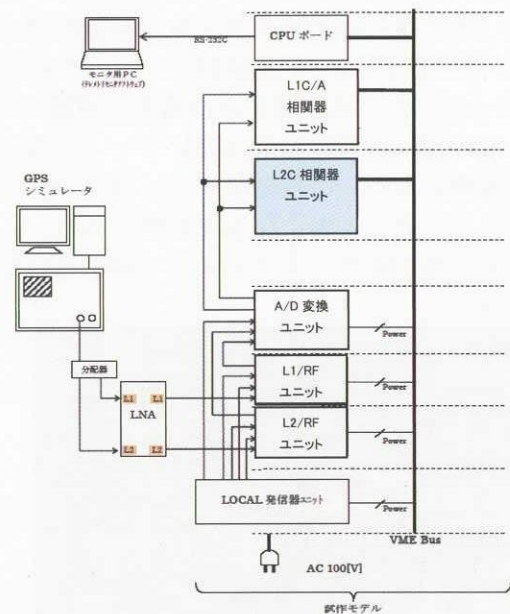


Figure.5 The Architecture of The Functional Model

(4) 次世代 2 周波 (L2C 対応) GPS 受信機試作モデルの試験評価

製作した次世代 2 周波 (L2C 対応) GPS 受信機試作モデルに対して、新規技術要素である L2C 信号の捕捉・追尾機能の検証や性能評価を中心に、宇宙用 GPS 受信機の観点で必要となる機能・性能の試験評価を実施した。試験評価には GPS 近代化に対応した Spirent 社製 GPS シミュレータ STR4760 (L1 C/A 及び L2 C(C/A)信号出力タイプ) を使用した。試作モデルにおける試験評価のコンフィギュレーションは Figure.5 による。

策定した設計仕様の妥当性を検証するため L1C/A 及び L2C 観測精度の評価試験、ALOS 軌道上シナリオによる評価試験を実施した。観測精度の評価試験ではガードパルス機能・性能試験や最低受信感度の確認も実施している。軌道上シナリオの試験では航法性能や 1PPS 基準時刻精度の評価以外に初期立ち上げ性能(TTFF)、捕捉性能(衛星切り替え時間)、ダイナミクス感度 (信号追尾条件) の確認、2 アンテナ構成時のアンテナ切り替え機能等の評価データも取得した。

試験評価結果のサマリを Table.3 に示す。Figure.6 に L1C/A 及び新設 L2C 信号に対する観測精度の評価結果を示す。また、Figure.7 には、ALOS 軌道上シナリオにて取得した 2 周波を利用したオンボード航法結果及びその精度評価結果を示す。本試作にて、GPS 近代化に伴い新設される L2C 信号の捕捉・追尾、航法への反映 (2 周波航法) が実現可能であることを確認した。現時点で L2C 搭載の GPS 衛星は軌道上に未配備のため、今後フィールド試験等にて評価する必要があるが、GPS シミュレータによる試験評価により所期の設定目標性能が達成可能であることを確認した。

Table.3 Evaluation Results Summary of the Functional Model

試作モデルの目標	試作モデルの試験評価結果																
高集積回路を利用した GPS 信号捕捉追尾	FPGA にて実現。ASIC 化の目処を得た。																
L1 C/A 6ch 以上、L2C 6ch 以上同時受信	FPGA にて実現。ASIC 化の目処を得た。DSP による L1C/A 及び L2C の捕捉追尾処理ができることを確認した。																
最低受信感度 L1C/A・L2C -136dbm 以上 (GPSL 入力端)	試作では-133dBm まで確認。-134dBm まで問題なし。-136dBm は現状努力目標であり、RF 回路の見直し等で可能。																
観測データ精度 (3σ) シュードレンジ: 10m 以下 デルタレンジ: 15mm 以下 搬送波位相: 10mm 以下 (条件: L1 C/A -134dbm 以上、 L2C-136.3dbm 以上 (GPSL 入力端))	-133dBm では、目標達成。-134dBm までは実現可能。 -136dBm は、努力目標。その場合、3dB 分の精度劣化が見込まれ、以下の仕様に見直しが必要。(*は、キャリアスムージング実施時の性能) <table border="1" style="margin-left: auto; margin-right: auto;"> <thead> <tr> <th></th> <th>L1C/A</th> <th>L2C</th> <th>L2C</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td></td> <td>-134dBm 以上</td> <td>-134dBm 以上</td> <td>-136dBm 以上</td> </tr> <tr> <td>シュードレンジ</td> <td>10m 以下 (2m 以下*)</td> <td>10m 以下 (2m 以下*)</td> <td>15m 以下 (3m 以下*)</td> </tr> <tr> <td>搬送波位相</td> <td>10mm 以下</td> <td>14mm 以下</td> <td>18mm 以下</td> </tr> </tbody> </table>		L1C/A	L2C	L2C		-134dBm 以上	-134dBm 以上	-136dBm 以上	シュードレンジ	10m 以下 (2m 以下*)	10m 以下 (2m 以下*)	15m 以下 (3m 以下*)	搬送波位相	10mm 以下	14mm 以下	18mm 以下
	L1C/A	L2C	L2C														
	-134dBm 以上	-134dBm 以上	-136dBm 以上														
シュードレンジ	10m 以下 (2m 以下*)	10m 以下 (2m 以下*)	15m 以下 (3m 以下*)														
搬送波位相	10mm 以下	14mm 以下	18mm 以下														
観測データ出力レート シュードレンジ・デルタレンジ 1Hz 以上 搬送波位相 20Hz 以上	1Hz 出力を確認した。 20Hz 出力も可能であることは、平成 14 年度の試作で評価済み。																
ダイナミクス 速度: 10km/s 以上 加速度: 10m/s ² 以上 ジャーク: 5m/s ³ 以上 (衛星搭載条件、相対成分の絶対値換算)	左記衛星搭載用の条件で評価し、特に問題なし。																
TTFB コールドスタート: TBD 分以下 ウォームスタート: 20 分以下 衛星切り替え(L1C/A、L2C): 60 秒以下	コールドスタート: 平均 1260 秒 ウォームスタート: 平均 52 秒 (従来実績と同等であり、適切な立上げコマンドが入力されれば、特に問題なし) 衛星切り替え: L1 C/A+L2 C: 39 秒(ALOS/GPSR は L1 C/A で 90s。ALOS/GPSR の L2P(Y) は 150~250s 程度であり大幅に改善する)																
航法精度(2周波航法) 位置 (RSS, 95%) : 26 m 以下 (85m@GDOP≥6) 速度(RSS, 95%) : 20 cm/s 以下 時刻 (RSS, 95%) : 85 ns 以下 (条件: 1 アンテナ航法時)	GPS シミュレータによる評価: 1 アンテナ構成: 10.4m, 3.5cm/s(95%) (6ch, 地球指向) 2 アンテナ構成: 14.2m, 4.3cm/s(95%) (6ch, 地球指向及び姿勢オフセットあり) 実環境の誤差要因を想定した予測値は、 12ch、2 アンテナ構成を前提として、 位置: 22 m(95%) 速度: 20 cm/s(95%)																

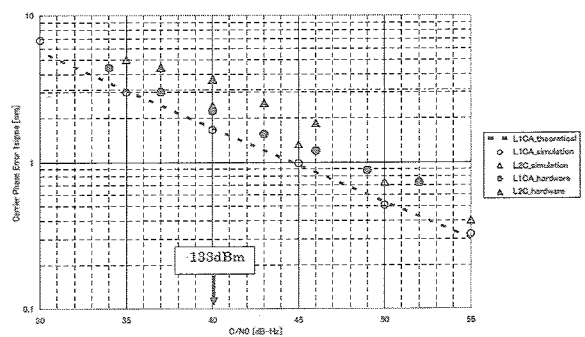
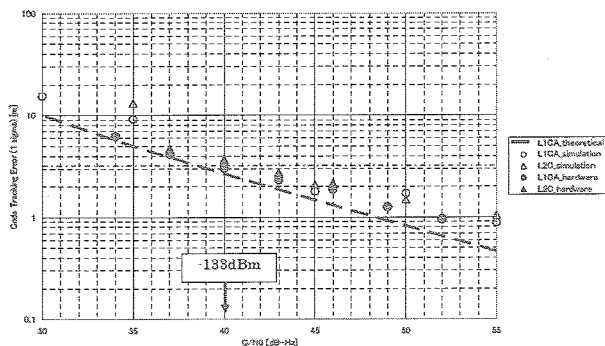


Figure.6 Evaluation Results of Observation Accuracy(Left:Pseudorange, Right:Carrier Phase)

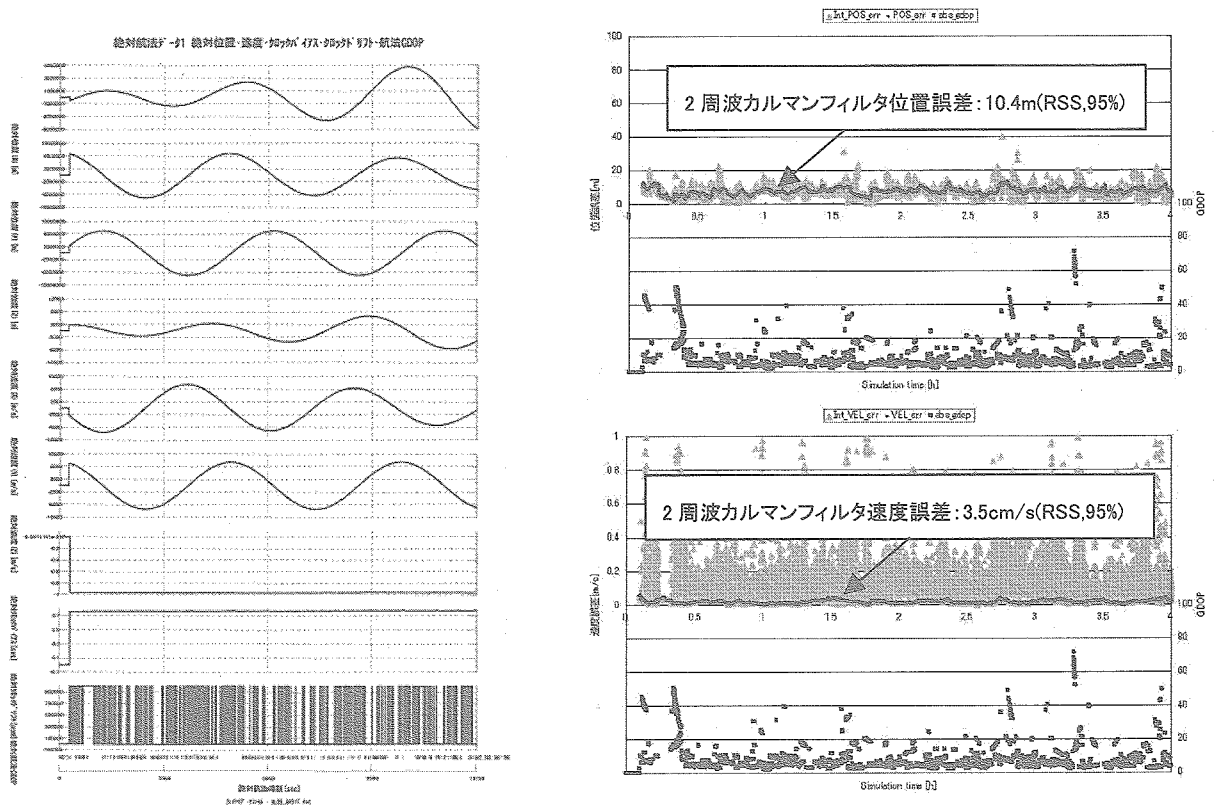


Figure.7 Onboard Navigation(Dual Frequency Navigation) Result Tested by GPS Simulator(Left) and Navigation Errors(Right)

4. まとめ

L1C/A、L2C 対応の次世代宇宙用 2 周波受信機の試作モデルを設計製作し完成させた。単体試験及び GPS シミュレータを用いた試験評価により所期の設計仕様の妥当性を検証した。これにより L1C/A、L2C 対応 2 周波受信機的设计ベースラインが確立した。また、デジタル処理部単体評価用装置 (GPS デジタル信号模擬部) の整備によりソフトウェア・デジタル処理部開発の効率化を実現した。

今後の課題としては、L2C 対応 2 周波 GPS 受信機機能モデルの完成 (BBM 相当、搭載モデルとほぼ同一設計とする)、オンボード航法ソフトウェア機能強化 (リカバリ機能、RAIM 機能)、軌道上データ評価結果の受信機設計への反映 (マルチパス対策検討及び影響評価) 等が挙げられる。平成 16 年度の研究開発としては、L2C 対応 2 周波受信機機能の完成 (12ch×2 周波フル実装、L2CNAV データの復調・解読方式の設計とインプリメント)、リカバリ機能 (MPU 側の SEU 対策機能)、RAIM (インテグリティモニタ) 機能の強化を行い、2 周波 (L1 C/A+L2C) GPS 受信機機能モデルとしての試験評価を行う予定である。今後も、GPS 近代化や他の測位システムの最新動向に配慮しながら、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 (ICD-GPS-200, IRN-200C-005R1), 14 January, 2003