

小型 LEO（低軌道）通信衛星の向け IoT プラットフォームで QLS1046-Space を活用して高性能プロトコルを実現

2022 年 3 月



概要

ここ数年で、モノのインターネット（IoT）技術は飛躍的に進化しました。これを支えているのが、広い領域をカバーする小型 LEO 通信衛星コンステレーションです。急速に成長する IoT においては、ユーザーやターミナル数の増加に対応しながらもエンドユーザーのサービス品質を向上させるため、効率的な通信プロトコルを利用する必要があります。高度なプロトコルを利用すれば帯域幅が広がり、レイテンシやエラーレートが低下し、対応するチャンネル数も増加します。

MBI グループでは LEO_{nida} アプローチを開発しました。この技術では、リターンリンク（RL）で、改良した拡張スペクトラム拡散 ALOHA（E-SSA）無線インターフェースを利用します[1]。E-SSA はランダムアクセス技術の一つで、従来からの ALOHA プロトコルの進化を受け、信号対ノイズ比（C/N）が 0dB よりかなり低い信号でも受信非同期バーストの復調が可能です。また、直接スペクトラム拡散（SS）と逐次干渉除去（SIC）を組み合わせることで、レシーバでの多重アクセス干渉の影響を除去しています。また、ターミナル間のシグナリングや調整が不要なので、ネットワーク管理の複雑さも最小限に抑えられます。LEO_{nida} ソリューションを利用することで、遅延に影響を受けにくいシステムが可能になり、不連続なサービスリンクや低密度コンステレーションなどの状況でもサービスの速度を確保できます。さらにフィード接続が不連続な場合に備え、ストアアンドフォワードも提供できます。

MBI グループではこれまでに地上処理用の RL LEO_{nida} ソリューションを提供してきましたが、複雑な復調技術が必要となる衛星搭載には未対応でした。処理能力が高く高効率の宇宙グレードのデバイスが登場したことで、小型 LEO 衛星でも高性能の計算プロトコルが実現できるようになりました。

このケーススタディでは、小型 LEO 通信衛星用の最新のアーキテクチャを紹介します。これはターミナルと衛星間の通信を改善するため、RL LEO_{nida} ソリューションを利用し、復調アルゴリズムを組み込んだものです。ここで提案しているアーキテクチャには、Teledyne e2v の宇宙グレードプロセッサモジュール QLS1046-Space を利用しています。この LEO_{nida} IoT プラットフォームは LEO 衛星に搭載可能で、狭帯域 IoT アプリケーションから低電力の IoT ターミナルまで対応できます。

まず、処理アーキテクチャを説明します。それから、宇宙向けに実装する場合のオプションを評価します。そして、実用的な実装と試験セットアップを紹介します。性能評価も実施し、結果についてもコメントします。最後に、次の段階についての考察を述べます。

1. 処理アーキテクチャ

E-SSA 通信プロトコルの処理アーキテクチャは 2 つの部分から構成されています。

- フロントエンド部では A/D および D/A コンバータが相互接続されており、デジタル信号を処理します。この部分は、受信のプリアンブルサーチャーと放出前のモジュレータとして機能します。演算は単純ですが、実行には決定性が要求されるため、通常は低電力 FPGA のプログラマブルロジック（PL）を使用します。
- バックエンド部はフロントエンド部と接続され、レシーバとオンボード HUB として機能します。複雑な演算と高度な計算能力が必要になるため、高性能のプロセッサコアが最適です。

小型 LEO（低軌道）通信衛星の向け IoT プラットフォームで QLS1046-Space を活用して高性能プロトコルを実現

2022 年 3 月



この部分には、プログラマブルロジック（PL）とプロセッサコアを組み合わせたハイブリッドなアーキテクチャが効率的です。コンポーネントの組み合わせと計算能力の関係を図 1 に示します。 中程度の性能のソリューションはナノサテライトに利用できますが、マイクロサテライト向けには大規模な計算能力が必要です。

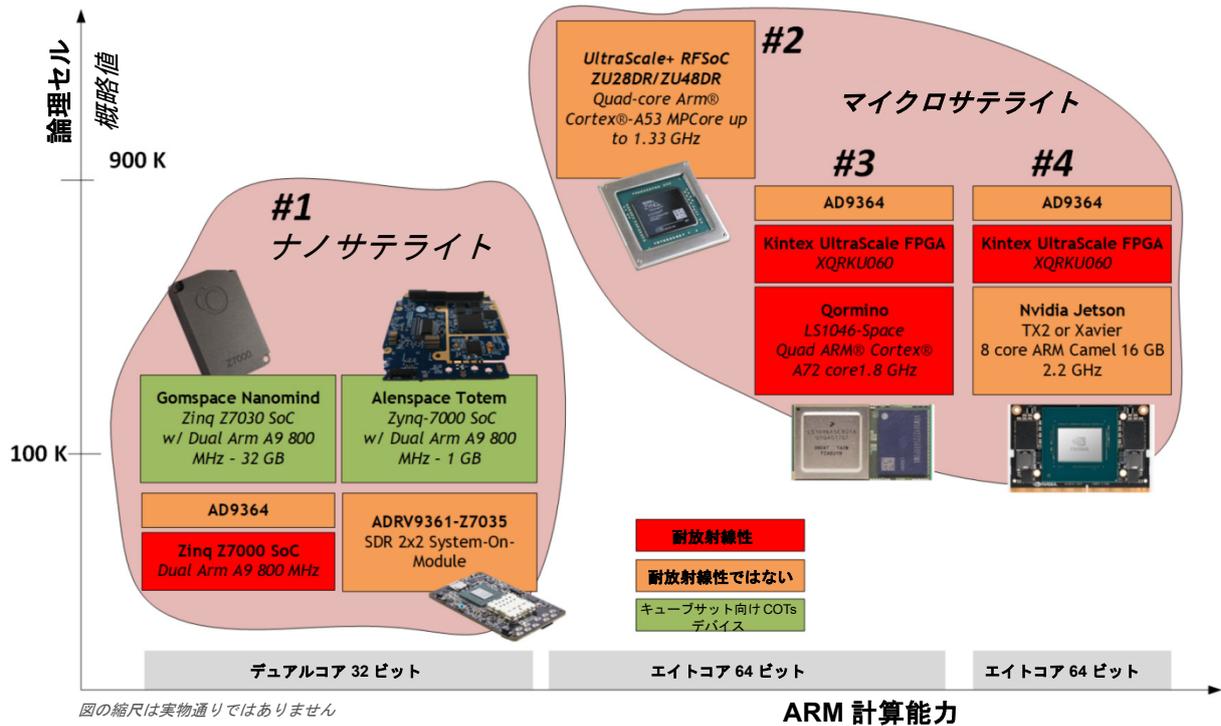


図 1 - 利用可能な処理アーキテクチャの性能

このオプションの中で、Teledyne e2v の QLS1046-Space プロセッシングモジュールと Xilinx の XQRKU060 FPGA との組み合わせは、耐放射線性能としては最も完全なユニットになっています。QLS1046-Space は耐放射線の宇宙グレードデバイスで、1.8GHz のクアッドコア 64 ビット Arm® Cortex A72 プロセッサと高速 4GB DDR4 メモリを搭載しながら、フォームファクターは図 2 に示すように非常にコンパクトです[2]。

プロセッサ	QorIQ®LS1046、1.8GHz の ARM クアッドコア / デュアルコアを搭載
メモリ	4GB DDR 積層メモリ、72 ビット BUS、ECC 保護
特性	動作温度 -55° ~ +125° コンパクトなサイズ 44 mm x 26 mm 長期保証 15 年以上



図 2 - QLS1046-Space の特徴

小型 LEO（低軌道）通信衛星の向け IoT プラットフォームで QLS1046-Space を活用して高性能プロトコルを実現

2022 年 3 月



QLS1046-Space と FPGA を組み合わせた処理スキームのブロックダイアグラムを図 3 に示します。ここでは、LEOnida IoT プラットフォームの小型 LEO 衛星への搭載を想定し、現実的なオンボードデータ処理アーキテクチャを示しています。E-SSA のプリアンブルサーチャーは FPGA でホストされており、LEO 衛星の 10～数 kHz にわたる大きなドップラーシフトに対しても、複数の周波数を仮定することで制御します。モジュレータは FPGA の PL でもホストされており、リアルタイムで動作します。予備研究からは、これらのタスクが低電力 FPGA でも実行できることが示されています。プロセッサ上では E-SSA レシーバとオンボード HUB が実行されます。試験結果としては、LEOnida プロトコルを完全に実行するためのプロセッサ選択の重要性が示されるでしょう。これが QLS1046-Space が選ばれた理由です。

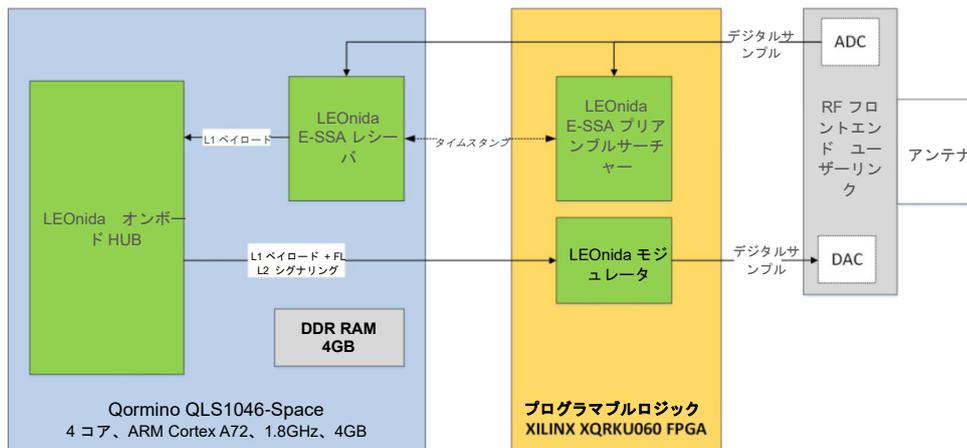


図 3 - 提案した QLS1046-Space と FPGA による処理方法

次のセクションでは、提案したプラットフォームの性能を実際に評価します。

2. 試験セットアップおよびソフトウェア実装

実際の試験セットアップは QLS1046-Space 開発キットをベースとしています。図 4 に示すように、インターフェイスを含めた完全な開発プラットフォームとなっています。

MBI グループでは、既に地上処理向けの E-SSA ソフトウェアを開発しています。ソフトウェアの開発言語は C++ で、CPU および GPU サーバ上で動作します。今回の研究では、MBI グループでは既存のソフトウェアを移植して QLS1046-Space 上で動作するように設定しましたが、開発時間を最小限に抑えるため、QLS1046-Space への最適化は実施しませんでした。このため、ここで提示する結果は、今回の新たなプラットフォーム用としてはまだ改良の余地があります。

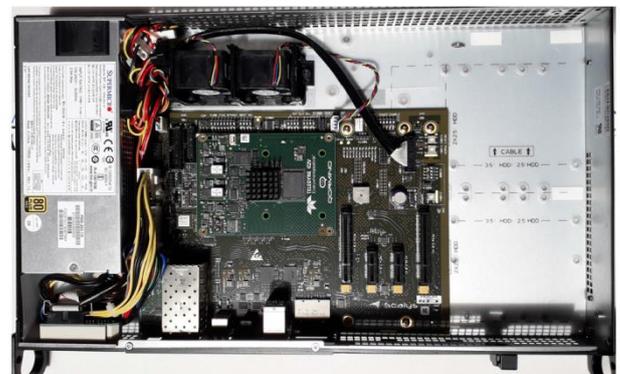
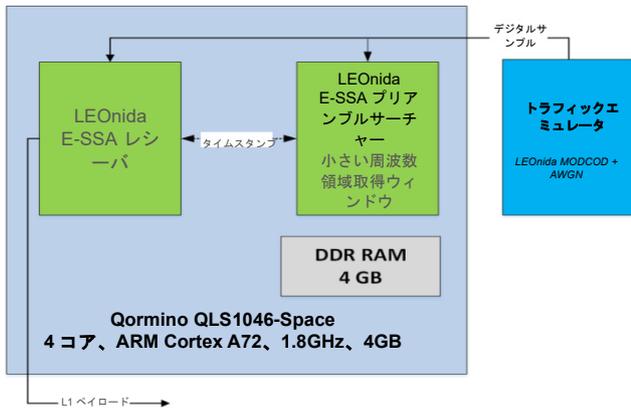


図 4 - QLS1046-Space 開発キット

小型 LEO（低軌道）通信衛星の向け IoT プラットフォームで QLS1046-Space を活用して高性能プロトコルを実現

2022 年 3 月



今回の主な目的はプロセッサ上の E-SSA レシーバの性能評価だったため、セットアップには FPGA は含まれていません。

このため、プリアンブルサーチャーを含めた完全な E-SSA レシーバを QLS1046-Space 上に移植しました。資源利用を低減するため、プリアンブルサーチャーは比較的小さい周波数領域取得ウィンドウで構成していません（通常は FPGA で動作させるため）。トラフィックエミュレータでサンプルを開発キットに導入しています。試験セットアップのブロックダイアグラムを図 5 に示します。

図 5 - 実際の試験のソフトウェア実装

3. 結果

性能評価の実施のために使用した様々な LEOnida MODCOD およびトラフィックジェネレータの構成を図 6 に示します。このうち修正したパラメータは、拡散率（SF）とデータサイズです。

LEOnida 波形 一定包絡線						テストベッド構成 AWGN チャネル + 小さいドップラシフト			
MODCOD	帯域幅	変調	コードレート	拡散率	データサイズ バイト	C/N (dB)	電力拡散 (dB)	ドップラシフト (Hz)	IC ループ数
MODCOD#1	60kHz	QPSK	1/3	16	38	-10	5	10	32
MODCOD#2	60kHz	QPSK	1/3	16	78	-10	5	10	32
MODCOD#3	60kHz	QPSK	1/3	64	38	-16	5	10	32

図 6 - 試験条件

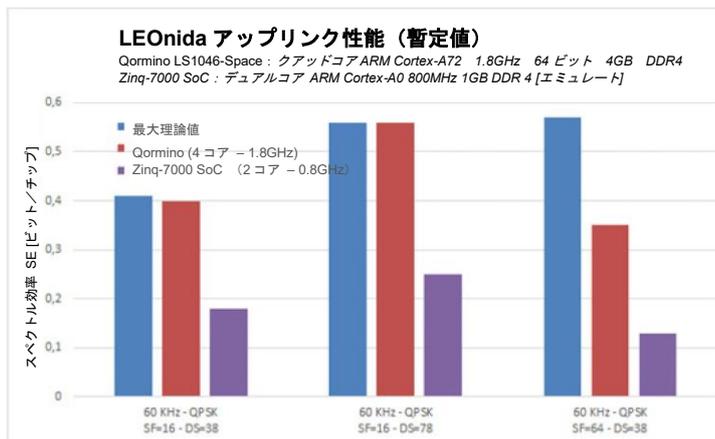


図 7 - 実用性能

性能評価は 3 つの条件で行いました。結果を図 7 に示します。このプロトコルの最大性能について、理論値を青、QLS1046-Space を使用した場合は赤、ZYNQ-7000 でエミュレートした場合は紫で表示しています。ZYNQ のエミュレートは、QLS1046-Space の 2 つのコアのみを使用し、CPU 周波数を低い 800MHz とすることで行っています。

小型 LEO（低軌道）通信衛星の向け IoT プラットフォームで QLS1046-Space を活用して高性能プロトコルを実現

2022 年 3 月



この結果から、取得したスペクトル効率は QLS1046-Space による制限を受けず、SF 値が 16 であることが明らかになりました。つまり、この条件で LEO nida プロトコルを最大限に活用できるのです。拡散率が 64 である点については、予測通り、QLS1046-Space が制限要因となっています。本研究ではコードを最適化していないため、QLS1046 に最適化したコードであれば、より高い性能を引き出せると考えられます。またこのアプリケーションでは、全ての条件において、QLS1046-Space はエミュレートした ZYNQ-7000 よりも優れた性能を持つことが示されています。

4. 考察および次段階について

このケーススタディでは、小型 LEO 通信衛星の IoT を提供する宇宙処理プラットフォームを提案し、評価しました。MBI グループは実用試験を行い、このプラットフォームで LEO nida E-SSA を衛星に搭載し、高度なプロトコルを利用できることを示しました。このシステムは、Teledyne e2v の QLS1046-Space プロセッサモジュールを FPGA に組み合わせることで実現できます。テストベッドのアーキテクチャを再利用し、地上ターミナルをドブラーシフトを補償できるように設計しておくことで、QLS1046-Space でホストされる LEO nida レシーバの軌道内デモンストレーションを実施することも可能です。

さらに、MBI グループはこの計算プラットフォームを利用したインテリジェントな信号アルゴリズム、例えば干渉周波数の検出、発生源の推定、緩和などへの活用の可能性も検討中です。現在はまだそのようなアルゴリズムの TRL は高くありませんが、QLS1046-Space 上に移植し、軌道内デモンストレーションにおいて試験することも可能だと考えられます。第一段階として、開発キットを利用した実験デモンストレーションを行い、このアプローチの実現可能性を検証していきます。

5. 参考資料

[1] Del Rio Herrero O, De Gaudenzi R., «High efficiency satellite multiple access scheme for machine-to-machine communications,» IEEE Trans Aerosp. Electron Syst., vol. 48, no. 4, October 2012. (デル・リオ・ヘレロ・O、デ・ガウデンツィ・R、《マシン間通信のための高効率衛星多重アクセススキーム》、IEEE Trans Aerosp. Electron Syst., vol. 48, no. 4, October 2012.)

[2] QLS1046-Space 製品ページ

<http://semiconductors.teledyneimaging.com/en/products/processors/qls1046-space>



詳細は、私にお問い合わせください
Yuki Chan,
 マーケティング & コミュニケーション
 マネージャー
Yuki.chan@teledyne.com



詳細は、私にお問い合わせください
Marc Stackler,
 セールス兼
 アプリケーションエンジニア
Marc.stackler@teledyne.com

