

# 新型チップを活用して衛星無線リンク（TT&C）を進化させる

2023年3月



TELEDYNE e2v | Semiconductors  
Everywhereyoulook™

## 概要

テレメトリ、トラッキング、とコントロール（TT&C）は人工衛星ネットワークの制御に欠かせない技術で、衛星から地上局への遠隔測定データの送信、位置や移動の追跡、衛星への運用コマンドの送信を行うライフラインとも言えるものです。TT&Cの目的は、衛星が正常に稼働していることを確認することです。TT&Cシステムは、一瞬でも障害が発生するとミッションの損失につながる恐れがあり、TT&Cに対する要求は急速に高まっています。今後、軌道上のトラフィックや衛星搭載インフラのスループットがますます拡大することが見込まれるため、このような事態に対応できる新たなソリューションが必要です。この資料では、先進的なTT&C設計を実現する技術も含め、変化を促すいくつかのトレンドについて説明します。

## TT&Cの目的

スムーズに衛星を運用するには、衛星に搭載した専用の機材（TT&C）で以下の3つを管理する必要があります。

- ・ 遠隔測定：宇宙機のサブシステムが感知した様々な状態を収集・処理、一般的な状態と運用状態を監視
- ・ 追跡：主に測距データのモニタリングすることにより、高精度な空間測位を行う
- ・ 制御：地上局ネットワークから受信したコマンドを実行し、運用を制御

最新のシステムでは既に革新的な自動運用が行われており、地上から制御機能に介入することはほとんどありません。また、ソフトウェア無線技術の導入が進み半自動的なオペレーションの必要性が生じていることから、今後のTT&C設計ではダイナミックな（無線による）システムの再プログラミングのルートも保持しつつ、オンボードの処理性能を拡大していきます。

## TT&Cを実装する上での課題

TT&Cサービスの実装には、エンドツーエンドのエンジニアリングの専門知識が必要です。このようなシステムの設計は非常に複雑なのでここでは扱いませんが、TT&C設計者が直面する課題は信号の符号化、変調、多重化、リンクや干渉の解析、代表的なTT&Cソフトウェアシミュレータの設計など、マイクロ波技術者にとって馴染みのあるものです。また、エンドツーエンドのリンクセキュリティがますます重要視されるようになり、データの暗号化や認証に関しても専門知識が必要になっています。

## TT&Cシステムの位置付け

TT&Cシステムでは、遠隔測定とは衛星の運用状況や健全性の状態の伝達を、遠隔指令とは地上のミッション運用管理局（MOC）からの実行すべき活動の伝達を意味します。最終的には、衛星の宇宙環境、位置、速度といった軌道上の情報が、衛星のタスクに影響を与えます。高スループット（HTS）通信衛星は例外ですが、多くの宇宙ミッションにおいてTT&Cシステムは衛星からMOCまでの主要なアプリケーションデータの通信経路となっています。そのため、アプリケーション次第で、TT&Cに必要なレイテンシとデータスループットが決まります。

TT&Cシステムは元々、地上に分散した地上局リソースを持つ比較的シンプルな地上MOCで構成されていました。しかし、時代とともに複雑さを増してきました。MOCへの接続の連続性を広げるため、地上局側では海洋に配置されたリソースも利用するようになり、さらに様々な宇宙ベースの追跡・データ中継衛星（TDRS）にも広がっています。また、TT&Cの運用には、グローバルな衛星ナビゲーションサービス（GPSとGalileo）や対応する通信インフラへのアクセスも欠かせません。

## TT&Cを支える技術

衛星のTT&C技術の進化の背景には、3つの要素技術があります。ベースバンド機器、アンテナユニット、TT&Cプラットフォームです。

# 新型チップを活用して衛星無線リンク（TT&C）を進化させる

2023年3月



**ベースバンド機器**：初期の TT&C は非常に複雑なアナログ設計技術を基に設計されていました。このようなアナログ設計に重点を置いた TT&C はアップグレードが困難でした。しかし、この 10 年間のデジタル回路やプログラマブルデバイス技術の急速な進歩により、TT&C の主要な機能は、フィールドプログラマブルゲートアレイ (FPGA) や DSP (Digital Signal Processing) チップを利用したデジタル設計で実現できるようになりました。さらに、無線 (over-the-air : OTA) の符号化アルゴリズムの進化により、主要な機能を適切なタイミングでアップグレードすることが可能になりました。

デジタルデバイスの進化のスピードは非常に速いため、次世代の SDR (ソフトウェア無線) 設計ではヘテロダインの周波数のアップ/ダウンコンバージョンをせずに、RF 信号から直接マイクロ波信号コンテンツを抽出できるダイレクト・コンバージョンのアプローチへと完全移行を検討している企業もあります。性能が進化して設計上の課題のほとんどがデジタル領域に集約されてきたことは、歓迎すべきパラダイムシフトです。これにより、幅広いロバスタなアプローチを利用した TT&C システム設計が可能になります。また、SWaP ファクター (サイズ・重量・電力) の制約にも対処しやすくなります。

**アンテナユニット**：TT&C の代表的なアンテナはパラボラアンテナで、使いやすくゲインが高いという特徴のほか、製造コストやメンテナンスコストが比較的低いという利点があります。しかし、追跡する衛星の数は徐々に増えており、サーボモーターによりアンテナを機械的に走査する方式では追従が困難になりつつあります。ここでは、アンテナ設計における最も重要な技術革新のひとつ、電子走査式のフラットパネル型フェーズドアレイ・アンテナ (PAA) の開発を紹介します。PAA では複数の RF キャリアビームを生成して複数の衛星を同時に追跡できるため、衛星への利用で注目を集めています。機械走査式のアンテナと違って、物理的な回転をせずに高速にビームを走査し、複数のターゲットを同時に追跡することができます。半導体技術の進歩がベースバンド・エレクトロニクス発展に繋がったように、電子ビームステアリング技術は TT&C システムにおける RF リンクの機敏性を高めています。

**TT&C プラットフォーム**：第一世代の衛星用 TT&C 局は、比較的低コストの地上インフラとして建設されました (図 1 参照)。しかし、その接触時間 (フライバイウィンドウ) は短時間で過ぎてしまうため、より高度に接触する必要のあるミッションを行うには、世界中に TT&C 局を配置する必要があります。しかし、これは現実的ではありません。多くの国や組織は独立した宇宙システムの運用を目指しているためです。解決を目指し、TT&C の進化の方向性は、次の 2 つの経路を取ってきました。

1. まず、海洋リソースを利用した TT&C 局の配置
2. そして、追跡・データリレー衛星を介した宇宙ベースの TT&C の利用です。

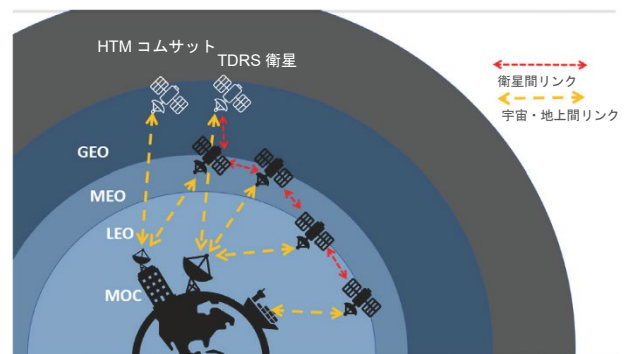


図 1 : TT&C 接続ルート

いずれにせよ、宇宙の資産の利用にかかるコストや複雑さは増加しています。民間企業の参入による宇宙開発競争の再燃を受け、この状況は今後 10 年以上にわたって継続すると予想されます。既に、SpaceX などいくつかの組織が広大な低軌道 (LEO) 衛星コンステレーションによるユニバーサルなインターネットカバレッジの提供に向けて動き出しています。このような状況では、TT&C の運用が重要な課題となります。

## 今後の TT&C の課題

今後、大規模な人工衛星コンステレーションを TT&C で管理すると、既存のリソースがさらに圧迫され、以下のような問題が起きる可能性があります：

1. 短いフライバイウィンドウの最中に、高度な認識マルチモード無線リンクを利用するための最大データ転送帯域を確保する方法が必要となること。さらに、接触時間を拡大するため、TT&C のインフラを TDRS のような宇宙ベースのものに移行することが増えていくかもしれません。
2. ミッションクリティカルなデータの送信を最大化するため、冗長な遠隔測定データの送信を減らすこと。これは、人工知能 (AI) を用いたオンボードでの自動的なデータ解析を意味します。
3. 無線周波数割り当て需要の急激な増加から、よりスマートで俊敏な無線システムを求める動きが再燃すること。マイクロ波のダイレクトコンバージョン技術の登場はタイムリーな展開と言えます。
4. どのようなミッション・プロファイルであっても、運用上のセキュリティはインフラ提供者にとって主要な問題であること。高価な軌道上の資産への不正アクセスを防ぐには、厳重なセキュリティ構造とデータの暗号化が必要です。



以上を考えると、TT&Cはネットワーク化されたシステムになることが確実で、テレメトリやトラッキング管理機能はMOCから衛星コンステレーション内の半自律的なフライトプランニングへと引き継がれます。衛星システムが軌道との相対的な位置関係を自律的に維持するために、コンステレーション間の測距センサーや搭載された慣性計測ユニットへの適切なアクセスを提供することを目指すのが合理的だと言えます。

## 現代の無線設計がもたらす影響について

適合符号化変調（ACM）には様々なデジタル変調方式があり、衛星フライバイデータのスループットを向上できます。チャンネルのデータ転送能力は、信号とノイズのパフォーマンスによって決まります。デジタル変調を適用した場合、単位伝送時間あたりの符号化シンボル数を大幅に増やすことが可能です（図2参照）。

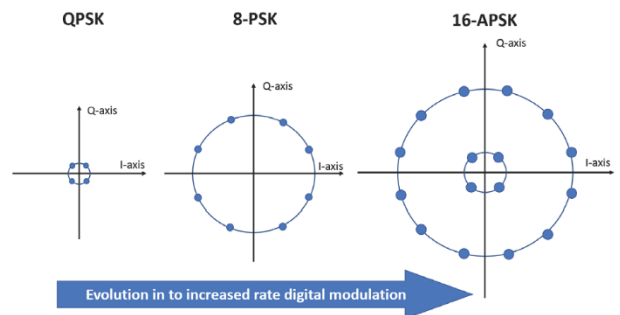


図2：スペクトル効率とデータスループットを向上させるデジタル変調の進化

## APSK - 衛星リンクのためのソリューション

APSK（振幅位相偏移変調）は、衛星伝送に最適な変調方式です。直交位相偏移変調（QPSK）よりもスペクトル効率（1シンボルあたりのビット数）が高く、直交振幅変調（QAM）よりも歪みにくいのが特徴で、両方の長所を兼ね備えている方式だと言えます。APSKの場合、信号点は一定の振幅を持つ同心円のリング上に構成されます（図3参照）。

QAMとAPSKは、どちらもQPSKより信号点あたりのビット数が多く、同じチャネル帯域幅でより多くのデータを送信することができます。ただ、QAMと違って、APSKの状態は同心円状に発生し、同じリング上の信号は圧縮に対して同じ動きをします。これには2つのメリットがあります。まず、圧縮すると各状態の間隔が狭くなるため、復調時に状態を区別しやすくなります。

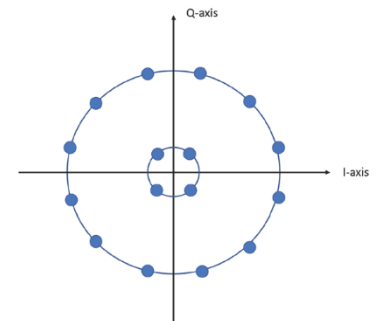


Figure 3: 16-APSK 配置

次に、APSKは送信前に配置リング間のオフセットを変化させるプリディストーションに適しており、歪みの影響を打ち消して受信信号強度を高めることができます。ダイナミックプリディストーションでは、受信した信号をモニターし、その結果をプリディストーション回路にフィードバックして継続的に調整します。ピーク対平均電力比（PAPR）も設計上の検討事項の一つです。このパラメータは、トランスポンダのアンプが送信する最大送信電力と平均電力の比率で規定します。この制約により送信可能なデータ量が決まります。平均電力はシステムの境界条件（電力や熱の制限など）を設定するためです。しかし、特定の変調に対する出力電力は、変調信号の過渡特性に左右されます。APSKはQAMよりもやや優位であり、特に宇宙での利用に適していることがわかりました。

柔軟な符号化（ACM）はTT&CとMOCの通信を長時間にわたって確保し、対象となる衛星のフライバイウィンドウの間にアップ/ダウンリンクをダイナミックに最適化することができます（図4参照）。理論的には、光回線によってさらに高速にデータ転送できる可能性があります。ただ、光学系には、照準線に合わせたステアリングやロックといった課題があります。光学的なフライバイの追跡は、依然として難しい設計課題です。

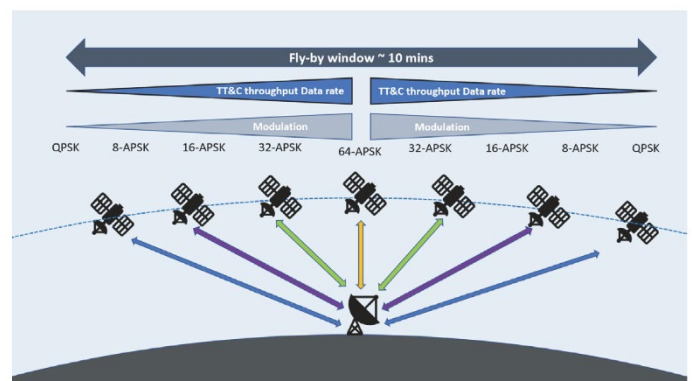


図4：ダイナミックACMによるフライバイデータスループットの最適化



# 新型チップを活用して衛星無線リンク（TT&C）を進化させる

2023年3月



将来的な TT&C システムの性能向上には、先進的な SDR を使用した新しい ACM 技術を活用することが重要で、そのためには最先端の半導体が必要です。

## TT&C ハードウェアの考察

TT&C に使用される最新のマイクロ波無線設計は、通常、L-、S-、C-バンドといった 1~8GHz の帯域に集中しています。RF 帯域幅が広いと、生産されている TT&C の大半は、従来のヘテロダイン設計（周波数のアップ/ダウンミキシング）頼みとなっており、最終的な中間周波数（IF）のデジタルベースバンドサンプリングに多大な投資が行われている状況です。既存のデータコンバータの帯域幅の制約から、Ku バンドまで直接変換する技術は考えにくかったものと思われます。しかし、今ではこの技術は手の届くところにあるのです。

**広帯域データ変換：** プロセス技術の進化により、2 桁近いギガヘルツ帯域幅の広帯域動作が可能になりました。例えば [EV12AQ600](#) の場合、6.5GHz の帯域幅を実現し、最大 6.4Gsp/s（4 相タイムインターリーブモード時）の信号サンプリングが可能です。Teledyne e2v の開発した革新的な 12 ビット ADC である EV12AQ600 は、マルチチャネル、タイムインターリーブ動作を容易にする便利なフロントエンドクロスポイントスイッチを搭載しており、非常に柔軟な SDR フロントエンドの構築が可能になりました。

Teledyne e2v ではその技術を限界まで高め、ku-band の上限を超えた領域までダイレクト・コンバージョン動作させることを目指しています。最近では 33GHz の -3dB アナログ入力帯域幅を持つ 12.8Gsp/s のサンプラー、[EV10AS940](#) を発表しました。また、現代の無線アーキテクチャーの要求に焦点を当てて開発に取り組んできた Teledyne e2v は、こうしたニーズを的確に捉えてライセンスフリーでオーバーヘッドの少ないシリアル・インタフェース、ESIstream を開発しました。ESIstream は 12Gsp/s を超えるデータスループットを実現し、様々なベンダーの FPGA を含めた幅広いデジタル処理コンポーネントをサポートしています。このプロトコルは、決定論的なデータレイテンシが低くハードウェアのオーバーヘッドが最小限で、システム間の同期をサポートします。

また、電子ビームステアリングによるフェーズドアレイアンテナでは、TELEDYNE e2v の同期処理技術が重要な役割を果たすことができます。TELEDYNE e2v の同期処理技術によって、複数の ESIstream データレーンにまたがる決定論的な同期が可能になります。さらに重要なのは、フロントエンドにおいて単純なシステム同期信号がデータコンバータチェーン間でカスケードされ、メタステーブルの回避ができることです。これにより、空間精度に重要な信号位相情報をシステム全体で維持できます。<sup>1</sup>

EV12AQ600 は、内蔵のサンプルインターリーブ回路を介して、可変レートでのサンプリングをサポートすることができます。各 ADC コアは最大 1.6Gsp/s のクロックで動作するので、ペアで逆位相サンプリングすると合わせて 3.2Gsp/s での動作が可能になります。4 つのコアを 4 相クロックでインターリーブすれば、1 チャンネルを 6.4Gsp/s でサンプリングすることも可能です。

**PolarFire FPGA：** 宇宙用デジタル処理システムとして最も先進的で汎用性の高いのが、Microchip Technology の FPGA [PolarFire®](#) シリーズです。低消費電力動作とセキュリティ機能を重視した製品で、ライセンスフリーの ESIstream ドライバを利用し、EV12AQ600 と組み合わせて使用できるようになりました（詳細はこちら：[ESIstream 公式サイト - ESIstream 14B/16B パッケージ](#)）

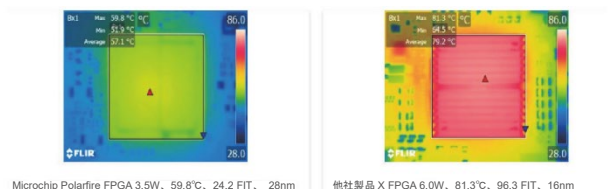


図 5：PolarFire® と他社製品の熱特性比較

PolarFire のデバイスは、他社製品にはない魅力を備えており、高度な宇宙用ソフトウェア無線での利用に最適です。

<sup>1</sup> メタスタビリティとは、システムが不安定な平衡状態を無制限に持続する性質のこと。

# 新型チップを活用して衛星無線リンク（TT&C）を進化させる

2023年3月



以下の点で有利です。

- 同程度の機能を持つ従来の SRAM FPGA の半分の消費電力で、熱設計のオーバーヘッドを低減（図 5）。
- [Rambus DPA 対策](#) を含む、軍事グレードのサイバー攻撃・タンパー防止機能<sup>2</sup>
- 耐故障性の設計で、設定変更にも対応可能
- 耐放射線性はトータルドーズ効果（TID）で 100k まで対応
- 24 x 10.3125Gbps（高速オプションの場合は 12.7Gbps）の SerDes レーン、マルチチャンネルのデータ伝送に対応。

耐放射線性（RT）の PolarFire® FPGA は、United Microelectronics Corporation（UMC）の 28nm 技術で製造された不揮発性のフィールドプログラマブルゲートアレイです。なお、SRAM はエラー訂正コード（ECC）で保護することも可能です。これは宇宙環境では重要で、こうすることで破損したデータによる作業を避けることができます。

セキュリティは、PolarFire FPGA を差別化する重要なファクターです。このファミリーは、暗号化キーストレージ用に 56KB のセキュアな不揮発性メモリ（sNVM）と組み合わせたデュアル物理複製困難関数（PUF）を備えています。さらに、内蔵されたタンパー検知器やアクティブな DPA 対策が機能し、軍事グレードのセキュリティを提供します。同様に、再構成可能な SDR を実現するために不可欠な軌道上プログラミングは、広範囲に渡ってテストされ検証されています<sup>3</sup>。

## EV12AQ600 と POLARFIRE は宇宙グレード TT&C を強化する理想的な組み合わせ

最新のチュートリアルでは、EV12AQ600 FMC カードと MPF300T-1FCG115E2 PolarFire プロセッサボードのペアリングについて詳しく説明しています（図 6）。このチュートリアルでユーザーは迅速にシステムに習熟することができ、初期プロトタイプエンジニアリングに備えることができます。チュートリアルでは、FPGA ボードのセットアップ方法と、EV12AQ600 に内蔵されたランプ波形発生器を利用する Libero SoC IDE プロジェクトについて説明します。さらに、相互接続された基板からサンプルデータを抽出する方法もご覧いただけます。

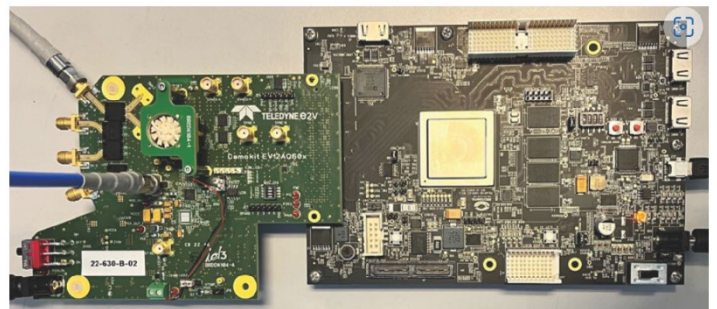


図 6 : PolarFire FPGA カードと EV12AQ600 FMC の組み合わせ

PolarFire FPGA と EV12AQ600 の組み合わせは、次世代 TT&C SDR 設計のための強力な実験プラットフォームとなります。現在は開発リソースがあるため、様々な ACM 構成を評価することが可能です。また、このシステムにより、市場投入までの時間も短縮されます。

<sup>2</sup> サイドチャンネル攻撃対策に用いられる Rambus 社の DPA 対策技術。

<sup>3</sup> RADECS 2021 : 軌道上プログラミングと Microchip RT PolarFire® FPGA ファブリックの SEE 特性評価。N. Rezzak, Member, IEEE, R. Chipana, C. Lao, G. Bakker, Member, IEEE, J. Mccollum, Member, IEEE, F. Hawley, Member, IEEE, K. O'Neill and E. Hamdy, Senior Member, IEEE

## 記事のリンク：

EV12AQ600 製品ウェブページ：<http://www.teledyne-e2v.jp/products/semiconductors/data-converters/ev12aq600/>  
 ESStream 公式サイト - ESStream 14B/16B パッケージ：<https://www.esistream.com/package/esistream-14b16b-package>  
 PolarFire FPGA ファミリー：<https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds/fpgas/polarfire-fpgas>  
 PolarFire FPGA 総電力量の最低値：<https://www.microchip.com/en-us/products/fpgas-and-plds/low-power>  
 Rambus DPA 対策：<https://www.rambus.com/security/dpa-countermeasures/licensed-countermeasures/>  
 EV12AQ600 と PolarFire の評価チュートリアル：<https://youtu.be/1iXG7gQjy90>



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](mailto: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](mailto:Marc.stackler@teledyne.com)

