

本文は著者 Thomas C. Butash 氏の許可に基づく次の記事の翻訳である。(This article was reprinted with the permission of Author Dr. Thomas C. Butash.) 28th AIAA International Communications Satellite Systems Conference (ICSSC-2010), AIAA2010-8715, 30 August - 2 September 2010, Anaheim, California

通信衛星の柔軟性及び実効容量の増加のための デジタル・オンボード処理の活用

Leveraging Digital On-Board Processing to Increase Communications Satellite Flexibility and Effective Capacity

Thomas C. Butash[†] and Joseph R. Marshall[§]

BAE Systems, Space Products & Systems, Manassas, Virginia 20110, United States

通信衛星サービスプロバイダは、地上の施設との競争力を持つ必要性を強く意識し、そのサービスコストを下げるのに有望な衛星搭載技術を取り入れてきた。マルチビームアンテナ (MBA: Multi-Beam Antenna), デジタルチャネライザ (DC: Digital Channelizer), デジタルチャネライザビーム形成器 (DCB: Digital Channelizer Beamformer), 復調, 復号化, パケット交換, 符号化, さらに通信路への変調を行う完全再生処理 (FRP: Fully Regenerative Processor)でさえ, 実効的な通信容量及び実現される柔軟性の増加が, 形状, 重量, 電力 (SWaP: Size, Weight and Power), 及びそうすることの財政的及びリスク (危機対応) コストに勝るときには採用されてきた。信号処理アーキテクチャにおける進歩とともに宇宙におけるムーアの法則に従う連続した進歩により, 通信衛星の有効容量と柔軟性を増加させるためのデジタル・オンボード処理 (OBP: On-Board Processing)を利用することにより SWaP, 価格, 及びリスクコストを劇的に下げてきた。本論文は, これらの OBPアプローチの利点を調査し, プロセッサ付き通信ペイロードシステムの採用によるコストの低下におけるムーアの法則と先進的信号処理アーキテクチャの有効性を検討する。

1. まえがき

通信衛星サービスプロバイダは, 売却可能または「実効」的な容量を最大とする一方で, 市場に提供するまでの時間及びサービス提供コストを最小とすることに非常に注目している¹⁻⁹。それ故, サービスプロバイダは非常に柔軟な通信衛星ペイロードを使ってこれらの目的を1つ以上達成してきた。マルチビームアンテナ (MBA: Multi-Beam Antenna)の配置は, 効果的に利用できる通信容量を増やすために, 3つ以上の色の付いた(color) (つまり, 割り当てられた周波数スペクトルサブバンド) 周波数再利用パターンで行われてきた。しかし, 周波数再利用係数, または実効容量倍数, N_b/N_c , (N_b ビームが N_c カラーを使って展開されるとき) は, 通信トラヒックが衛星の関係サービスエリアで一様に分布しているときのみ完全に実現される¹。この制限を考慮して, サービスプロバイダは, 空間的に一時的に変化するトラヒック要求に整合するように各ビームに動的にバンド幅を割り当てるため, デジタルチャネライザ (DC: Digital Channelizer)を採用している。不幸にして, より高効率 MBA-DC ペイロード容量さえも, より高い周波数再利用係数によってのみ実現するのだが, (より高い再利用係数にすると)許容できる搬送波対干渉波電力比 (C/I)が実際のアナログ MBA の限界に達し

[†] Technical Director and Engineering, Fellow, 9300 Wellington Road, MS MVA01-011, Associate Fellow AIAA

[§] Senior Principal System Engineer, 9300 Wellington Road, MS MV01-012, Associate Fellow AIAA

てしまう。それ故、通信衛星設計者はトラヒックパタンにもっとよく整合するように、また実効容量をさらに増加させるように、スペクトル内容、配置及びビームの形を動的に変えるようにデジタルチャネライザビーム形成器 (DCB: Digital Channelizer Beamformer) と直接型または反射鏡給電型のアレーを統合するようになった。

DC 及び DCB 基盤の通信衛星ペイロードは波形を選ばない「デジタル・ベントパイプ」トランスポンダを実現することになり、衛星の無線インターフェイス (Air-interface) の変調及び符号化方式に変革が起きるのは必然である。しかし、これらのデジタルベントパイプシステムの明らかな利点、相対的な簡単さ及び流行にも拘わらず、いくつかの通信衛星サービスプロバイダ及びシステム設計者は、完全再生処理 (FRP: Fully Regenerative Processor) に基づくアーキテクチャを利用することにより、更に高い容量を求めている。より高い情報伝送速度を達成するために、FRP システムは、衛星を経由するすべての通信トラヒックを復調し、復号化し、符号化し、変調することから得られる付加的なエンド・ツー・エンドの回線マージンを利用することにより、容量を増加させることができる。FRP システムは上り回線から下り回線を分離し、少なくとも 2~3 dB の付加的な SNR (信号対雑音電力比) を実効的に得る。この付加的なマージンは、通常は、もっと高いレートに符号化及び/またはより高度な変調をするために使われる。さらに、FRP システムは度々、可能な時はいつでも適した回線状態を利用するために、より高度な変調及び/またはより高いレートの符号化さえ動的に使うことによって、さらに通信容量を増加させるために適応型符号化/変調 (ACM: Adaptive Coding and Modulation) を採用する。急増するトラヒックを持つ応用において、FRP システムはまた、統計的なトラヒック多重化を通して付加的な実効容量利得を実現するために高速パケット交換 (fast packet switch) を採用する。

ソフトウェア無線 (SDR: Software Defined Radio) 基盤の OBP システムは、デジタルベントパイプシステムの波形を選ばない柔軟性を維持する一方、FRP システムの実効容量の利点を享受する。SDR OBP またはソフトウェア無線ペイロード (SDP: Software Defined Payload)² システムは、FPGA やプログラム可能縮小命令セットコンピュータ (RISC: Reduced Instruction Set Computer) またはデジタルシグナルプロセッサ (DSP: Digital Signal Processor) とともに実行される再構成可能コンピュータ (RCC: Reconfigurable Computer) である程度実現されている。故に、SDP は、再生処理やルーティングに特有の新しい波形を扱うために軌道上でプログラム可能である。しかし、この柔軟性は、価格の問題となる、すなわち、ASIC (Application Specific Integrated Circuits) 単体で実行される同等の OBP システムより非常に大きな SWaP となる。

幸運にも、ムーアの法則により予測されるデジタル信号処理の性能の進歩は宇宙においても継続している。そして、最近のより効率のよい信号処理アーキテクチャと関連付けるとき、これらの進歩は、オンボード処理によって通信衛星の実効容量を増加させるための SWaP、財政コスト、リスクコストを大きく減少させる。

II. オンボード処理システム

通信衛星開発者及びサービスプロバイダは、サービス提供のコスト (通常は cost/bit/second または cost/bps という単位で測定される) を、今後 10 年間で 1 桁から 2 桁下げるという手強い挑戦に直面している¹。サービスの平均コストを下げることは、もっと大容量を実現するために必要なコストの増加以上に、通信衛星の平均の売却可能な、または、「実効」容量を増やすことにより達成できる。半世紀以上の間、シャノンのチャンネル容量定理は、

$$C \approx 1/3 B \log_2 SNR$$

つまり、通信チャネルの達成可能容量 C (bps)は、チャネルバンド幅 B (Hz) 及び送信電力によって決定されるということを示している。しかし、通信衛星応用において、割り当てられた帯域幅と送信電力が制約されていることが重大なことである。それで、通信衛星システムの開発者は、容易に予測できることだが、新しいペイロード技術と柔軟なシステムアーキテクチャを使って帯域幅、電力及びシステムのコストの制約内で実効容量を最大とすることを追求する。

実効容量を増すように設計された初期のシステムでは、**図 1** に示すようにアナログのベントパイプ・マルチビームアンテナ (MBA: Multi-Beam Antenna) を採用した。そのようなシステムにおいて、ビーム数 N_b とスペクトルサブバンド (colors) 数 N_c は、実際のアンテナと許容できる C/I (搬送波対干渉電力比) 特性の制約内で、周波数再利用係数を最大とするよう選ばれる。しかし、アナログ MBA システムはサブバンド内での (アナログフィルタ及び IF マトリクススイッチ経由の) 交換の柔軟性を制限していた。それ故、通信トラヒックがシステムビームに亘って一様に分布するときに暗黙の起こりうる実効容量倍数、 N_b/N_c を達成するに過ぎない。不運にも、一様なトラヒック分布はめったに存在せず、通信容量は度々「立ち往生」(つまり、対応する要求なしにビームに静的に割り当てられる) し、他のところでビーム帯域幅を超える要求にはサービスできないということになる。

アナログ MBA ペイロードは、ビーム帯域幅を空間的、時間的に変化するトラヒック要求に適応整合させ実効容量を最大とする能力はないので、デジタルチャネライザ (DC: Digital Channelizer) を基にする MBA システムを採用することになる。**図 2** に示すように、DC は、どのチャンネルでも入力ビームから出力ビームへ送るためにビームチャンネル周波数²分割逆多重化、デジタルチャンネル交換、出力チャンネル周波数分割多重化の柔軟性を提供するために MBA システムの中心に置かれる。DC はまた、各チャンネルの絶対及び相対利得を独立に自動的に調整でき、それ故、パルス及びアナログペイロード振幅応答変動に対するデジタル

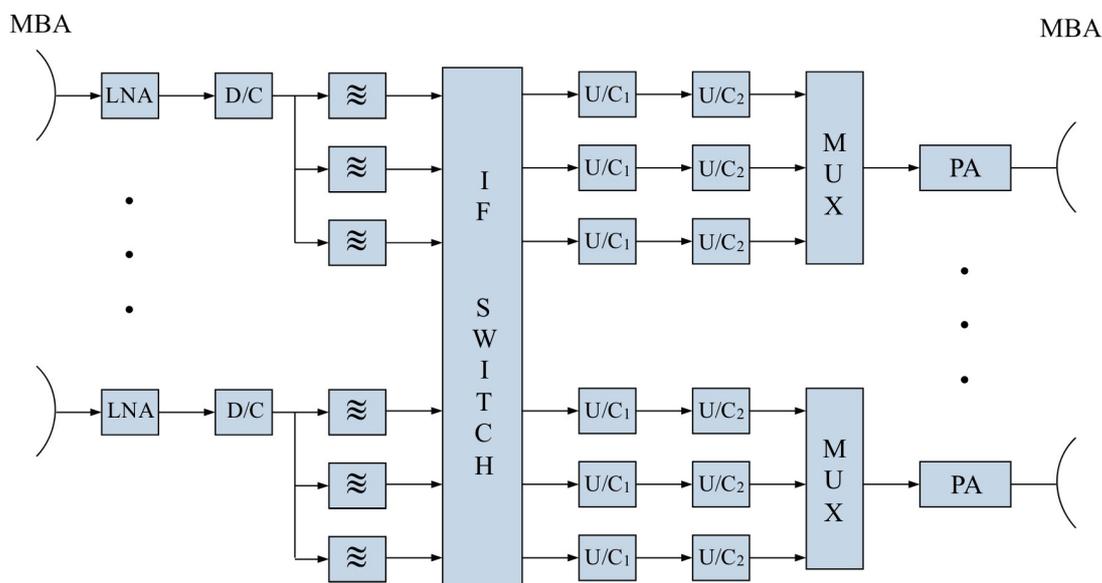


図1 アナログ・ベントパイプ・マルチビームアンテナ (MBA) ペイロード

** DC は、時分割逆多重化、交換、多重化を同じ要求の応用にも使える。

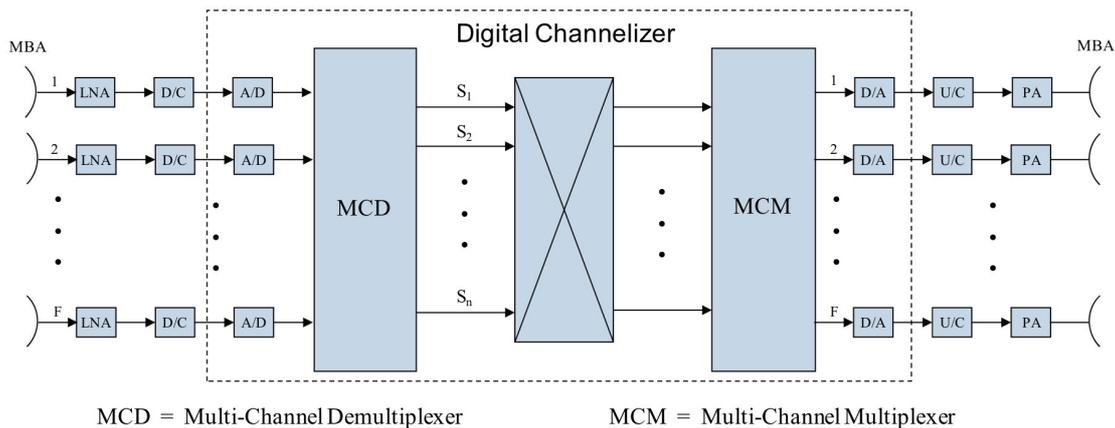


図2 デジタルチャネライザ(DC)-MBA ペイロード

的補正ができる。ACeS (Asia Cellular Satellite) 及び WGS (Wideband Global SATCOM) システムは実効容量及びシステム性能を最適化するために DC のチャンネル交換の柔軟性を利用している。

DC は、交換ビーム帯域幅及び送信電力と整合するように設計されたマルチポート増幅器またはフレキシブル進行波管増幅器 (flexi-TWTA) と併用すると、システムコストの相応の増加なしに衛星の実効容量を増加させる。事実、解析によると、DC 基盤の MBA システムは典型的なトラフィック形態においてアナログ MBA システム³より 10%から 30%容量を増大させる。需要が衛星サービスエリア全体に広く動的に変化するような応用において容量を 2 倍にすることができる¹⁰。典型的な MBA 通信衛星が軌道上コストを約\$250M とし、DC に整合する交換可能な、柔軟な電力増幅器を追加するのに増加するコストは\$10M~\$15M とすると、DC 基盤の MBA システムは明らかに cost/bps を下げた状態で増加した実効容量を提供する。さらに、モジュール的に設計・構成された DC は、標準の入出カインターフェイスを提供し、事実上、MBA 通信衛星ペイロードの中心でパラメトリックにプログラムされたフィルタ及び交換器との集合体を構成する。従って、共通の MBA ペイロードを広範囲の応用の要求に合うようにデジタル的にカスタマイズすることができる標準の中心的 DC の集合体で設計することは、確かに多数の市場にサービスするための時間とコストを減少させる。

デジタル・チャネライザ・ビーム形成器 (DCB: Digital Channelizer Beamformer) は、通信トラフィックの空間変動や要求が実際に配置したアナログ MBA の限界を超えると思われる応用において採用される。図3に示すように、DCB は、受信及び送信フェーズドアレーからそれぞれアナログ入力を受信し、アナログ出力を生成する。DCB は、動作中の各受信、送信通信チャンネルに対してデジタル的に各ビームを形成するように構成することができる。また、トラフィック需要を基にする各ビームの帯域幅、配置、形状、及び他の潜在的な干渉を起こすビームの配置を動的に変えるためにチャンネルビーム制御の重み付けを適応的に発生するよう設計される。従って、DCB は同一チャンネル干渉を減少させ、他の点では固定のアナログアンテナの実効的な C/I を増加させる。DCB はまた、アナログマルチビーム・フェーズドアレーアンテナに固有の位相及び振幅応答の時間的及び温度依存変動を補正するようにデジタルビーム形成の重み付けの調整に使うよう構成することができる。

必要なビーム数がフェーズドアレーエレメントの数と同等またはそれを超える場合の典型的な DCB 応用においては、DC の中心でデジタルビーム形成を行うためのコストの増加より、実現される柔軟性と実効容量の増加の方が勝っている。さらに、もし DCB 固有の適応ビーム

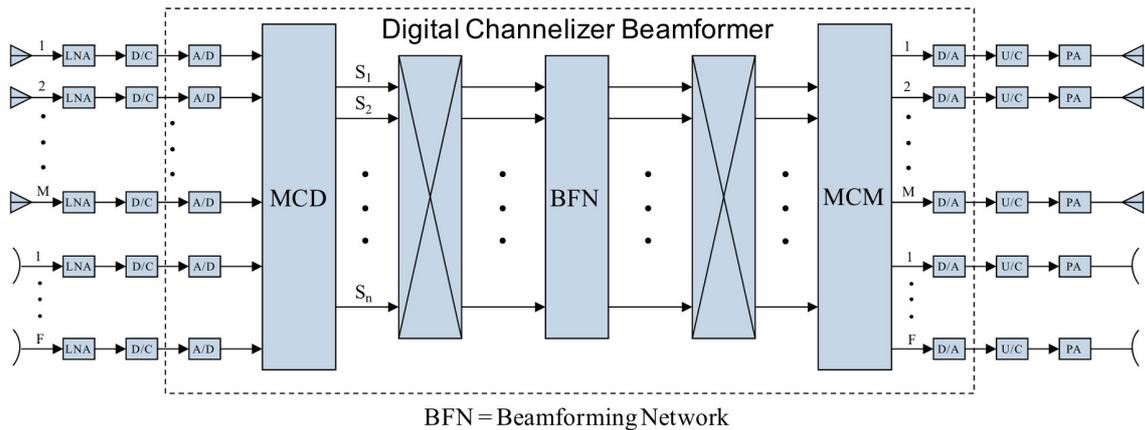


図3 デジタルチャネライザ・ビーム形成器 (DCB) OBP

ム形成能力が全部使われると、MBA-DC を基とする通信衛星の実効容量をアンテナの実際の口径による限界以上に伸ばすことができる。従って、DCB を基礎とするシステムは、トラヒックの成長が高く、要求されるアンテナ特性（即ち、非常に多くのより小さなビームがビーム指向方向のデジタル的安定に必要とされるような）が実際に展開されるアナログ MBA の能力をいつも超える移動衛星サービス (MSS) 応用によく使用される。Thuraya 及び Inmarsat-4 通信衛星は高い実効能力を持つ MSS システムを支えるために DCB を採用している。

完全再生中継プロセッサ (FRP: Fully Regenerative Processor) OBP システムは、図4に示すように、通常アナログ MBA 入力信号をデジタル化し、SCPC (Single Carrier Per Channel) 信号データを生成するために各入力信号をデジタル的に周波数分割逆多重化し、上り回線の送信源情報ビットを再生するために各々のトラヒックチャンネルに復調し、復号化する。通常、高速パケット交換 (Fast packet switch) が、大容量の送信において、上り回線のデータを効率的にパケット化し、交換機に通し、下り回線に送ることにより統計的な多重化利得を実現するために、FRP の中核として採用される。さらに、FRP 交換を通すデジタル帯域幅(bps)は、DC または DCB を基とするシステムの中で等価的な（復調前の）ディ

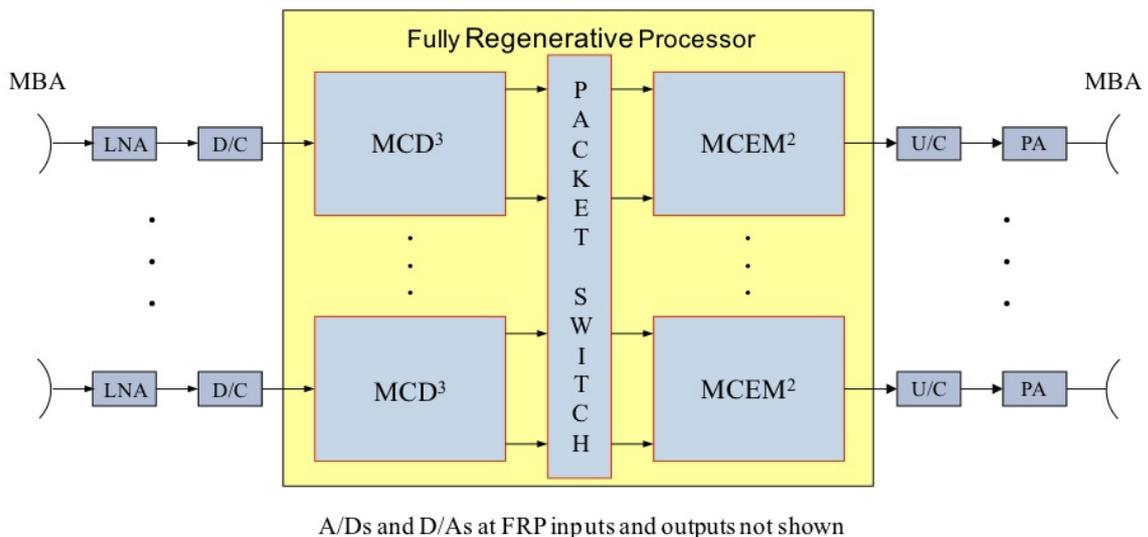


図4 完全再生中継 (FRP) OBP (MBA 構成において図示)

デジタルベースバンド交換に必要な帯域幅より少なくとも 1/25 となる^{††}。FRP OBP システムではまた、もしフェーズドアレーがアナログ MBA の代わりに採用されるならば、周波数分割逆多重化操作の後に、デジタルビーム形成をすることができる。交換機の 2 次（出力）側において、各ユーザの 2 進情報は搬送波上にチャンネル符号化され、変調される。それから、生成された変調搬送波データは多重化され、デジタルからアナログに変換され、通信ペイロードの送信部分の出力信号を生成するためにアナログ再構成フィルタに通される。上り回線（入力）の通信チャンネルで採用されるチャンネル符号及び変調は、送信される下り回線チャンネルで使われるチャンネル符号及び変調と同じである必要はないことは明らかである。従って、FRP OBP システムは異なる回線プロトコルを採用する端局間の 1 ホップ通信を容易にする翻訳機として働く。しかし、多チャンネル逆多重化器、復調器、復号器 (MCD³: Multi-Channel Demultiplexer, Demodulator, Decoder) が多チャンネル符号化変調器、多重化器 (MCEM²: Multi-Channel Encoder Modulator, Multiplexer) のいずれかの機能が SWaP を最小とするために ASIC で実行されるなら、FRP OBP システムは、FRP が特別に設計されたものとは異なる通信プロトコルを使って、いくらか柔軟性を欠き、上り回線か下り回線の端局が使えなくなる。このため、FRP OBP システムは、通常、通信衛星サービスプロバイダのみが、プロバイダのネットワークで動作するように設計された端局を使う「私的ネットワーク」に使われる。Iridium や Spaceway は商用の FRP OBP 基盤の通信衛星システムの例である。

FRP OBP システムは比較的柔軟性に欠けるとはいえ、DC 及び DCB と違って、設計したものの以外のプロトコルを使って上り回線と下り回線の端局を結ぶことはできないから、これらのシステムはデジタルベントパイプ以上に極めて容量の利点を楽しむ。確かに、FRP システムは、信号を復調し、システムの上り・下り回線で起こるチャンネル誤りを独立に訂正することによってデジタルベントパイプによって達成されるもの以上に通信衛星の実効容量を増やす。それ故、システム容量を増やし、上り・下り回線を切り離すことによって達成される回線マージン SNR 利得は、少なくとも 2~3 dB (復調-変調を実行することの損失を含めて) であるけれども、飯田¹¹ は、適応型符号化/変調 (ACM: Adaptive Coding and Modulation) が慎重に使われるときには 15dB にもできることを示した。さらに、付加的な実効容量利得は、激増するトラヒック応用における高速パケット交換 (fast packet switch) を採用する FRP における統計的トラヒック多重化を通して実現することができる¹²⁻¹³。従って、FRP OBP システムは付加的通信容量を得るために端局の適応柔軟性を犠牲にする。しかし、この利得は、等価のデジタルベントパイプ OBP システムから受けるものよりもっと高い SWaP とコストを犠牲にして得られる。

ソフトウェア無線 (SDR: Software Defined Radio) を基礎とする OBP は、上り回線及び下り回線の波形を選ばないデジタルベントパイプシステムの柔軟性を支える一方、FRP ASIC 基盤の OBP 通信の利点を理論的に提供することができる^{††}。これらの所謂ソフトウェア無線ペイロード (SDP: Software Defined Payload) は、上り回線及び下り回線のプロトコル信号処理、交換、接続要求を最適にするために再プログラム可能であるので、究極的な軌道上柔軟性を提供する。しかし、次の節で示すように、SDP のほとんど「普通の」信号処理能力は ASIC だけで実行される等価な OBP ペイロードよりもっと高い SWaP の価格となる。

III. ムーアの法則と信号処理アーキテクチャの宇宙における利点

^{††} 1bps/Hz の変調効率、10 ビットの信号データ量子化及び 2.5 倍の実際のナイキストサンプルレートを仮定する。

^{††} SDR OBP は、通常、再構成可能コンピュータ (RCC: Reconfigurable Computer) で RFP システムを実行するけれども、それらは再プログラム可能、再構成可能な DC と DCB も実行するのに使うことができる。

ディジタル集積回路技術, アナログ-ディジタル, ディジタル-アナログ変換(ADC 及び DAC) 及び DSP アーキテクチャの利点は, 通信衛星の柔軟性や実効容量を増やすために OBP を適用するときにかかる SWaP, コスト及びリスクの増大を劇的に減少させた。確かに表 1 に示すように, 耐放射線, 宇宙飛翔実績のあるディジタル ASIC 及び FPGA 技術は, 地上の最速に比較して遅いペースではあるが, ゴードン・ムーアの一般に受け入れられている法則によって予測されるように, 増大する実装密度及び低消費電力化への道に沿ってきた。過去 15 年以上に亘って, チップのクロック速度及び最大のウェーハチップでの使用可能論理ゲート数 (largest die usable logic gate counts) は各々 10 倍及び 60 倍に増加した一方, 耐放射線 CMOS ASIC の電力消費は, 1/16.7 に減少している。同様に, 過去 10 年間は, ゲートアレーのクロック速度及び最大のウェーハチップでの使用可能論理ゲート数 (largest die usable logic gate counts) はそれぞれ 3 倍及び 20 倍に増加する一方, 耐放射線 FPGA の消費電力は 1/6 以上の減少となった。以下に示すように, これらの進歩は, 処理ペイロードを適用するのに増加する SWaP コストを下げ一方, OBP 機能, 性能, 通信衛星の柔軟性及び実効容量を増やすように働く。

表 1 宇宙飛翔実績ディジタル信号処理技術

Parameter	Radiation Tolerant CMOS ASIC Technologies					Spaceflight Qualified FGAs			
	1994	2001	2007	2010	201X*	2000	2004	2007	2010
Year of Introduction	1994	2001	2007	2010	201X*	2000	2004	2007	2010
Lithography (nm)	500	250	150	90	45	220	150	90	65
Relative Power Dissipation	16.7	8.3	3.3	1	0.8	43.4	21.7	10.8	7
Useable Gates (M) on Largest Die	0.5	6	12	30	70	1	6	18	20

* Currently under investigation

耐放射線, 宇宙飛翔実績のある ADC 及び DAC の性能は, ディジタル処理ロジックの性能と全く同じ速さでは進歩しなかったけれども, コンバータの最大サンプルレートの改善, 有効ビット数 (ENOB: Effective Number Of Bits), アナログ入出力帯域幅, 及び電力消費は新しい OBP 信号処理アーキテクチャ及び SWaP を低くすることを総合的に可能とした。確かに, 過去 15 年に亘って, sub-Gsps^{§§}コンバータの電力消費は 1/3.1 に低下した。この間, 1.0~1.5Gsps の状況下で運用するコンバータは, 10 年毎に有効ビット数を 1 ビット増加し, 最新のデバイスでは, 8~10ENOB¹⁴ が得られている。これらの性能レベルはディジタル変換及び 500MHz 程度の情報帯域幅を持つ受信信号のサブバンド定義フィルタリングの実現を裏付けるのに十分過ぎる。これによって, 通信衛星ペイロードのフロントエンドに見られる多くのアナログフィルタ構造は不必要となることになる。

過去 15 年に亘る耐放射線, 宇宙飛翔実績のあるディジタル処理技術における進歩によって得られる可能な OBP SWaP の減少を示すために, ACeS MBA-DC ペイロードを考える。元の ACeS MBA-DC ペイロードの顕著な特性は次のようである¹⁵⁻¹⁶ :

- 受信 154 ビーム, 送信 154 ビームの反射鏡型 88 エLEMENT 送受アナログビーム形成 MBA
- 168 (154 移動体受信ビームと 14 受信フィーダリンク) のアナログ入力信号を量子化し, ディジタル的に逆多重化し, 交換し, 多重化し, 168 (154 移動体送信ビームと 14 送信フィーダリンク) のアナログ出力信号を発生する DC 処理
- 1994 年代の最新の耐放射線, 宇宙飛翔実績の ADC, DAC 及び 500nm の CMOS ASIC 技術を使って開発され, 製作された DC

§§ 本 Selected Paper 紹介者注 : Gigasample per second

- DC の最大消費電力は 704W, 重量は 64kg

もし我々が最新の耐放射線, 宇宙飛翔実績の ADC, DAC 及び 90nm CMOS ASIC 技術を使うなら, 元のアナログ送受信ビーム形成器 (及び 1 つかそれ以上のアナログ RF 下り, 上りコンバータ段を削除) を次のような新しい ACeS DCB アーキテクチャのデジタルビーム形成器に取り替えることができる:

- 14 受信フィーダリンク及び 88 受信フェーズドアレーエレメントのアナログ入力信号の各々を量子化し, 元の DC で実行されるのに等しいデジタルチャンネル化を行う
- デジタル的にビーム形成した 154 受信, 154 送信移動体ビーム
- デジタル的に逆多重化した 14 受信フィーダリンク, 交換, 14 送信フィーダリンク信号に多重化
- 88 の反射鏡給電及び DCB 出力での 14 フィーダリンクアナログ送信信号の生成

この最新の ACeS DCB は, 推定される最大電力消費は 152W で, 重量は 16kg である。従って, 最近の ASIC とコンバータ技術及び強化型信号処理アーキテクチャを最適に使うことによって, 我々は元の ACeS DC の SWaP を 1/4 以上減少させ, 柔軟性を増大させ, デジタルビーム形成において固有の実効容量を増大させ, 元のペイロードのアナログ受送信部分の複雑性と SWaP を減少させる。さらに, OBP SWaP における 75% 以上の減少は, 強化型 DCB アーキテクチャによって整備した単純化したアナログ RF 受送信チェーンの使用から実現する付加的な重量, 電力の節約を含まないものである。

上に示した例のように, 宇宙飛翔実績のあるデジタル処理技術の性能進歩を, 先進信号処理アーキテクチャとともに最適に利用すると, OBP SWaP の劇的な減少になる。確かに, 処理帯域幅, 速度, 及びダイナミックレンジの固有の利点が全部投入できるとすれば, 先進 OBP 信号処理アーキテクチャは全上り通信信号を直接サンプルし, 量子化する。この直接サンプリングは, 全てのダウンコンバータではなく, 通信ペイロードのアナログ RF フロントエンドにおいてサブバンド定義フィルタと同様にいくつかの関連する局部発振器及びフィルタの必要性をなくすであろう。すべてのフィルタリングは, 低電力デジタル OBP システムによって達成され, かなりの SWaP, コスト及びリスクの節約だけでなく冗長性と実効容量の増加をもたらす。さらに, 第 3 ナイキスト帯域^{***}で運用する高速 DAC は, 必要な多くの送信周波数において出力信号の直接のデジタル・シンセシス (合成) 及びアナログ再構成を容易にする。従って, 通信ペイロードの RF バックエンドも簡単にする。これらの可能な通信衛星ペイロード SWaP の節約は予測できる将来の連続した, 衰えないムーアの法則によって予測される進歩と同じく成長すると期待される。

IV. 処理付きペイロードの柔軟性の最終目的 (Ultimate): ソフトウェア無線ペイロード

ソフトウェア無線 (SDR) OBP またはソフトウェア無線ペイロード (SDP) は, 変化する通信要求に応えるために軌道上でプログラム可能であるから, 処理付きペイロードの柔軟性の最終目的を与える。幸運にも, SDR OBP システムの実際の SWaP, コスト及びリスクは, 最近の宇宙飛翔実績のあるデジタル処理技術の進歩によってある応用では考慮されてきた。SDR は, FRP の実効容量とデジタルベントパイプの波形を選ばない柔軟性の両方を要求する OBP システムに採用されるであろう。これらの一見したところ相反する要求はすべての固有の波形, 軌道上再プログラム可能な資産における再生信号処理の SDR の実行によって同時に満たされる。比較的少数の入出力端子を接続するための高速パケット交換かインターネット

*** 本 Selected Paper 紹介者注: サンプリング周波数の 1.5 倍の周波数

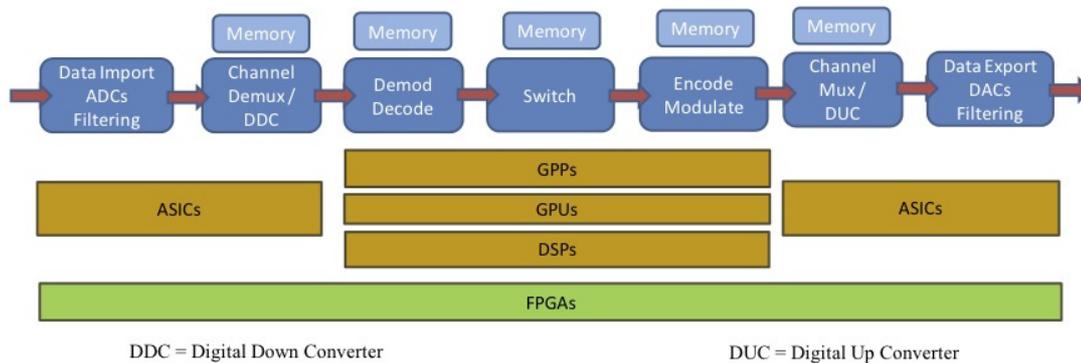


図5 ソフトウェア無線ペイロード処理フロー及びアーキテクチャ

トプロトコル (IP) ルーティングと一体となる OBP システムにおいては、システムの展開に許される時間とコストの制限が厳しいとき、SDR を採用する。しかし、今日まで、宇宙における SDR の使用は、再プログラム可能なデジタル処理デバイスが同じ CMOS 技術で同じ機能を実行するときに ASIC より 1 桁から 2 桁大きな電力を消費するという回避できない事実によって制限されてきた。確かに、FPGA は、電力消費のレベルが ASIC より 1 桁大きい (例えば、表 1 で、90nm と 150nm の製造技術における FPGA と ASIC の電力消費レベルを比較せよ)。従って、SDR システムの再プログラム可能という資産は、通常、通信衛星の寿命期間に亘って物質的・機能的変更が必要になるような機能のみを実行するために使われる。これらの機能は、図 5 に示すように、FRP アーキテクチャにおいて復調、復号化、符号化及び変調のような特定信号の回復及び再生を通常含んでいる。他方、入力多チャンネル逆多重化 (MCD: Multi-Channel Demultiplexer) 及び出力多チャンネル多重化 (MCM: Multi-Channel Multiplexer) は、単純なパラメトリックな軌道上変更以上のものは通常要求しない。さらに、MCD 及び MCM は、両者で FRP のおよそ 50~60% の全電力消費となる。それ故、特にパラメトリックな再構成を通じて、高範囲のチャンネル逆多重化と多重化の要求を機能的再プログラムなしに実現できる「普遍的」な MCD/MCM 信号処理アーキテクチャの進歩を考慮すると、それらは電力効率のよい ASIC で実行されるであろう。

表2 RCC FPGA 支援エレメントの進歩

RCC Support Element	2000 Design	Package	Size (sqin)	Power (W)	2010 Design	Package	Size (sqin)	Power (W)
Micro-controller/System I/F	Separate ASIC	Large CGA	2.25	1	Single ASIC	Medium CGA	1	0.9
Micro-controller memory	Separate Device	5 Medium DFP	3	0.5	Embedded in ASIC	-	0	0
Mitigation logic	Separate Device	Medium CQFP	2	0.7	Embedded in ASIC	-	0	0
Configuration memory	3 MB volatile	7 Medium DFP	3.5	1.2	8 MB non-volatile	4 Medium Stacks	4.4	1.5
Totals			10.75	3.4			5.4	2.4

通信衛星の SDP は典型的には 1 つかそれ以上の再構成可能コンピュータ (RCC: Reconfigurable Computer) に基づいている¹⁷。RCC の基本要素は、図 6 に示すように 1 つ以上の宇宙飛行実績のある FPGA (主処理、及び/または、交換エンジン)、FPGA における初期設定及びシングルイベント (SEE: Single Event Effect) 設定エラーを引き起こす放射線のその後の検出と修正のための耐放射線論理デバイス、蓄積機能のあるゲート機器のための SEE に影響されない構成メモリ及び RCC の運用及び外部制御インターフェイスを管理するための耐放射線マイクロコントローラから成る。1 つ以上の RCC FPGA の構成は、外部デバイスからの高速データ入力またはそれへの出力インターフェイス及び交換を行うためにしばしば使われる。1 つ以上の FPGA は、また、RCC 及び SDP の論理中心で交換「関連」を達成するために使われ、ペイロードのプログラム可能な信号処理、交換及び接続性を実行される通信応用に最適とすることを可能とする。

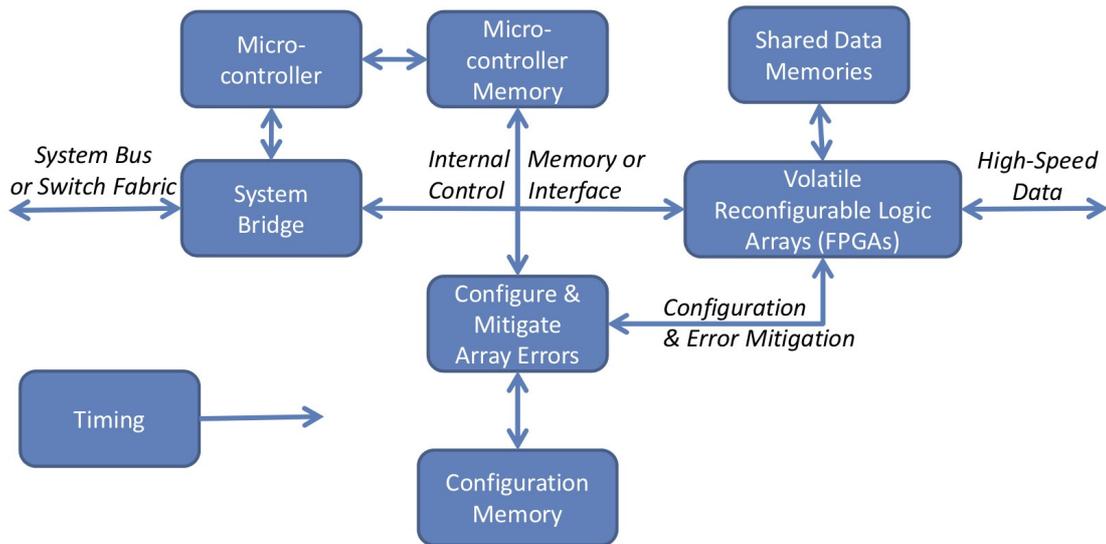


図6 再構成可能コンピュータ (RCC) : アーキテクチャ及び基本エレメント

図6には示されていないが、もしシステム設計計画 (SDP⁺⁺⁺) 上、高レベルのプログラム可能性やそのようなデバイスによって支えられる高効率データ依存処理 (例えば、決定指令受信機) を必要とするなら、RCC は、耐放射線・宇宙飛行実績のある汎用プロセッサ (GPP)、グラフィクス処理ユニット (GPU) 及びデジタル信号処理 (DSP) ユニットで増強できる。しかし、特に GRP は、同じ機能を実行し、同一チップ技術で製造されるとき、FPGA より1桁大きい電力を消費する。それ故、GPP、DSP 及び GPU は、通常は、データ依存・決定指向処理の柔軟性が要求され、主たる処理アルゴリズムが通信衛星の寿命期間に亘って進化することが期待されるときに限り採用される。そのような応用においては、高レベルプログラム可能な、汎用処理デバイスは処理のアップグレードを支援するためにより効率的であり、容易に再プログラムされる。

宇宙飛行実績のある FPGA と RCC 支援エレメント技術における進歩は、SDR OBP 及び SDP を実施するために RCC を採用する SWaP、コスト及びリスクを減少させるために統合される。表1及び表2に示すように、FPGA とその支援エレメントの電力消費は、過去10年に亘ってそれぞれ84%及び30%減少した。一方、これらのエレメントの能力及び特性は同じ期間に60倍以上増加した。これらの進歩を考慮して、Intelsat 14 は、SDR 基盤の RCC を一部実行する主ペイロードつまり宇宙インターネットルータ (IRIS: Internet Router In Space) を搭載して昨年打ち上げられた。

V. 結論

過去15年間の、耐放射線、宇宙飛行実績のあるデジタル処理技術の進歩は、通信衛星の柔軟性及び実効容量を増やすためにデジタル OBP を使ってコストを減少させ、見返りを非常に増やしてきた。この期間に、基本的なデジタル信号処理 ASIC 及び RCC 技術の消費電力、単一ウェーハチップの使用可能ロジック及びクロック速度の特性は、その進歩の速度が減る気配はなく、それぞれ6~17倍、20~60倍、3~10倍の範囲で改善された。ACeS

⁺⁺⁺ 本 Selected Paper 紹介者注 : System Design Plans の略

MBA-DC ペイロードの仮説的な再設計で示されるように、そのような技術を発展させることによって、先進的、革新的信号処理アーキテクチャが最適に採用されるとき、OBP SWaP を控えめにみても 1/4 倍以上に減少させる一方、OBP の機能性及び通信ペイロードの柔軟性、実効容量を増加させる。これらの観察と高い性能のデジタル信号処理アーキテクチャ及び技術の厳しい追求は通信衛星システムの将来に非常に明るい展望をもたらすものである。

謝辞

著者は、BAE システムズ、技術ソリューション及び宇宙製造&システムの Kevin Bassett 及び Ken Knowles に耐放射線、宇宙飛翔実績のある ADC 及び DAC 技術に関する彼らの有益な研究に対し感謝する。

文献

- 1 Evans, B., and Thompson, P., "Key Issues and Technologies for a Terrabit/s Satellite," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Anaheim, CA, 2010.
- 2 Angeletti, P., De Gaudenzi, R., and Lisi, M., "From 'Bent Pipes' to 'Software Defined Payloads': Evolution and Trends of Satellite Communications Systems," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, San Diego, CA, 2008.
- 3 Anzalchi, J., Couchman, A., et al., "Beam Hopping in Multi-Beam Broadband Satellite Systems," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Edinburgh, Scotland, UK, 2009.
- 4 McKinnon, D., "Evaluation of Flexible Payload Technologies for Use in Conventional GEO Communications Satellites," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, San Diego, CA, 2008.
- 5 Angeletti P., Colzi, E., D'Addio, S., et al., "Performance Assessment of Output Sections of Satellite Flexible Payloads," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, San Diego, CA, 2008.
- 6 Hughes, R., Warren, R., et al., "High Throughput Fully Processed Payload for Broadband Access Networks," 13th Ka and Broadband Communications Conference, Turin, Italy, 2007.
- 7 Balty, C., and Gayrard, J., "Flexible Satellites: A New Challenge for the Communications Satellite Industry," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Seoul, Korea, 2007.
- 8 Gayrard, J., and Rousset, D., "Future Trends in Digital On-Board Processors for Telecommunications Satellites," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Seoul, Korea, 2007.
- 9 Angeletti, P., and Lisi, M., "How Did Metcalfe's Law Affect Satellite Systems Architectures?," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Seoul, Korea, 2007.
- 10 Rusch, R., "Where is Ka-band Service Headed?," 15th Ka and Broadband Communications Conference, Cagliari, Italy, 2009.
- 11 Iida, T., "Regenerative Process Gain at the Rain Condition in the Satellite Communications Link," Journal of the Communications Research Laboratory, Vol. 45, No. 3, pp. 79-94, November 1998.
- 12 Bever, M., Freitag, J., Linsky, S., et al., "Fast-Packet Vs. Circuit Switch and Bent Pipe Satellite Network Architectures," 4th Ka and Broadband Communications Conference, Venice, Italy, 1998.
- 13 Clebowicz, B., and Rubin, S., "Development of Very Large Scale Digital Signal Processing Payloads for Space," AIAA International Communications Satellite Systems

- Conference, Montreal, Canada, 2002.
- 14 Angeletti, P., Gallinaro, L., et al., "Evolution of Analog to Digital Conversion Technology for Wideband Space Applications," AIAA International Communications Satellite Systems Conference, Rome, Italy, 2005.
 - 15 Wiemann, K., "The ACeS Digital Channelizer – The Next Generation in Regional Digital Satellite Telephone Communications," AIAA/IEEE Digital Avionics Systems Conference, Philadelphia, PA, 2000.
 - 16 Jespersen, N., "Satellite-Based Cellular Communication," IEEE Microwave Magazine, Vol. 1, No.2, June 2000, pp. 38-43.
 - 17 Marshall, J., and Robertson, J., "Increasing Performance and Removing Bottlenecks in Reconfigurable Space Processing," IEEE Aerospace 2007 Conference, Big Sky, MT, 2007.

本 Selected Paper 紹介者コメント

本論文はBAEシステムズのフェローでAIAA TCCSの元委員長であるDr. Butashによるもので、2010年8月にAIAA ICSSCにて発表されたものであるが、同様の論文は2010年10月のKa Band Conferenceにおいても発表されている⁺⁺⁺。この論文においてはデジタル・オンボード処理技術の最近の進歩が述べられており、Thuraya, Inmarsat-4, Iridium, Spaceway, ACeS, Intelsat 14の例が記述されている。特に論文では、新旧でほぼ同じ特性のACeSペイロードの消費電力、重量が、1/4以下となると述べている。そして、これらの技術は通信衛星システムの将来に非常に明るい展望をもたらすと締めくくっている。我が国で製作される衛星についてはどうなっているのかはデータを持ち合わせていないが、本論文は、少なくとも将来の通信衛星の考えるに際し、役立つのではないかと思う。

本論文ではやや翻訳し難い部分もあり、平滑な和文とはなっていないところが多くなってしまったが、内容を汲み取って頂ければと思う。また、本論文は紹介者の論文を文献11として引用している。本論文は通信総合研究所のJournalに1998年に発表したものであるが、通信総合研究所季報（和文）にも発表しているので^{sss}、ご興味のある方にはお送りすることができます。

JSFC 特別顧問 飯田尚志

⁺⁺⁺ T.C.Butash: "On-Board Processing for Increased Communications Satellite Flexibility and Capacity", 16th Ka and Broadband Communications, navigation and Earth Observation Conference, Milan, Italy, Oct.20-22, 2010.

^{sss} 飯田尚志: "衛星通信回線における降雨時の再生中継利得について", 通信総合研究所季報, Vol.44, No.4, pp.293-306, Dec. 1998.