

## 論文の内容の要旨

論文題目 左右円偏波利用によるX帯Gbps級偏波多重衛星通信  
X-band Gbps-class satellite communications with  
right- and left-hand circular polarization multiplexing  
氏名 金子 智喜

本論文は、JAXAのRAPIS-1 (RAPid Innovative payload demonstration Satellite 1) に搭載され宇宙実証された「左右円偏波利用によるX帯Gbps級偏波多重衛星通信」を要とする。

第1章では、1つのロケットに複数の小型衛星を搭載する相乗り打ち上げにより人工衛星の数が飛躍的に増えたことで生じた地上局の飽和と周波数利用の混雑についての問題を紹介した。近年、利用ニーズの高まっている合成開口レーダ (Synthetic Aperture Radar (SAR)) 用いた干渉画像を効率的にダウンリンクするためには同一の軌道面に2機の人工衛星を配置する必要がある。10分以内の1回のパスで100 Gbitと仮定したSAR画像のダウンリンクを効率的に行う衛星運用を想定した。私達の研究チームではINnovative-technology Demonstration EXperiment (INDEX) という60 kg級の人工衛星の運用を行っている。この経験より、1機の人工衛星からSAR画像を1分でダウンリンクするという目安を立て2 Gbps以上の通信速度を目標にした。このような中、2.65 Gbps通信を実現するために左右円偏波多重や64APSKに注目した。本通信システムは100 - 150 kg級の人工衛星に搭載することを想定しており、2000 kg級のALOS-2が実現した1.2 Gbpsや3000 kg級のWorldView-3が実現した0.8 Gbpsよりも高速である。また、本通信システムはPlanetLabの実現した1.2 Gbps通信よりもCross Polarization Discrimination (XPD)の点で優れている。復号性能の検証要求は「フレームの先頭から20万フレーム誤りなく復号できること」と「 $E_s/(N_0+I_{XPD}) = 21 - 26$  dBのダウンリンク信号を300フレームずつ2秒おきに区切ってもドップラの追従ができフレーム誤りなく復号できること」にした。

第2章では、左右円偏波を用いた偏波多重により通信速度を2倍にすると、偏波干渉が生じてしまい通信品質が劣化する問題について2つの解決策の概要を説明した。1つ目の解決策は、XPDに優れたアンテナを用いてXPDの劣化を減らすことである。そこで、3種類の両偏波アンテナの中からXPDに注目してコルゲートホーンアンテナとセプタム型偏波分離器を組み合わせたアンテナを選定した。このアンテナのXPDは給電導波管であるセプタム型偏波分離器のセプタム形状でままる。本研究では高品質な64APSKを目指したので、市販のセプタム型偏波分離器のXPDでは不十分であった。そのため、「伝搬モードに注目することでXPDに優れたセプタム型偏波分離器を設

計する理論」を提案する必要がある。2つ目の解決策は、大気伝搬中の偏波状態を予測してそれに適したクロストークの補正パラメータを得る手法である。具体的には、ポアンカレ球にプロットされた偏波状態をもとに適切な補正パラメータ演算をしてクロストークを除去する手法とクォータニオンニューラルネットワークを用いて偏波状態を予測する手法を組み合わせることである。そして、偏波予測型クロストークキャンセラの指針について記述した。クロストークを2つの手法を用いて除去することで、信号対雑音比 $E_s/(N_0+I_{XPD})$ を大きくして信号品質を向上させることが可能となる。

第3章では、クロストークを減らして信号品質を向上させるためにXPDに優れたアンテナの設計理論を提案した。偶モードと奇モード給電に注目して伝搬モードを理論的に扱うことでXPDに優れたセプタム型偏波分離器を設計するZero total-reflection At fourth septum Elements (ZAFE)法を提案した。ZAFE法では、セプタム型偏波分離器を直列接続されたリッジ導波管とみなし、横共振法を用いて遮断波長を計算する。偏波分離器の各ポートに給電する電波は偶モードと奇モードの重ね合わせで表現される。そして、偶モード給電時における方形導波管の伝搬モードと奇モード給電時におけるリッジ導波管の伝搬モードに注目して、それらの位相差が $90^\circ$ になるようにセプタム形状を決める。これに加えて、各段における反射係数を定量的に扱い、奇モード給電による反射係数の総和 $\Gamma$ を4段目セプタムで相殺するようにセプタム形状を決定する新たな解析的なアプローチである。ZAFE法により単一の周波数で $\Gamma=0$ となっていることをアイソレーションのピーク(実測値: 45 dB 周波数ズレ: -0.4%)より検証した。さらに、偏波分離器のSパラメータモデルを用いて偶モード給電時と奇モード給電時の位相差の実測値が $90^\circ$ であることを検証した。そして、ZAFE法を用いてセプタム形状を考察することで、電界シミュレータによる試行錯誤的なパラメータスイープ無しでXPDに優れたセプタム型偏波分離器の設計・評価に成功した。この時、偏波分離器にコルゲートホーンアンテナを取り付けて偏波パターン法を用いて実測したXPDは8.0 - 8.4 GHzにおいて37.8 - 44.7 dBとなった。このことは、単一周波数のみで理論的な設計を施すことで $\pm 2.5\%$ の帯域幅を確保できることを表している。以上より、ZAFE法は様々なマイクロ波コンポーネントを設計する際にも、単一の設計周波数と帯域幅について有意義な洞察を与えてくれる。

第4章では、大気伝播中に劣化した左右円偏波のXPDを補正するための手法の指針を示した。ポアンカレ球は偏波状態を表していることが知られている。入力層に11個、隠れ層に10個、出力層に1個のパーセプトロンから構成されるニューラルネットワークを用いてポアンカレ球上の点を予測した。偏波を回転体として考えた場合、各軸のオイラー角方向に回転させると回転軸の順番により偏波状態が変わってしまう。そのため、クォータニオン座標系を用いて偏波の状態を表すことで、回転軸によらず偏波状態を計算できるようにした。偏波をクォータニオンで表すために左右円偏波を写像変換して得られる水平・垂直偏波からストークスパラメータを算出する。そして、ストークスパラメータを電波の全エネルギーで正規化することで偏波状態をポアンカレ球上にプロットできる。その後、ポアンカレ球上で適切な偏波補正パラメータを探すことでクロストークの除去が可能になる。ポアンカレ球上の点は原点から等方的であるため等方的な活性化関数を

隠れ層に用いた。また、ポアンカレ球の表面に偏波状態をプロットするために出力層には正規化する活性化関数を用いた。クォータニオンニューラルネットワークによる偏波状態予測の理論を人工衛星からのダウンリンク信号を用いて実証した。ダウンリンク信号をポアンカレ球上にプロットしところ、水平・垂直偏波の成分が周期的に時々刻々変化することが確認された。また、この偏波状態はアンテナエレベーションの角度に応じて変化するため、偏波補正のパラメータも時々刻々変化する。そして、パラメータ演算によるクロストークの除去と偏波状態の予測を組み合わせることで、偏波予測型クロストークキャンセラの方針を示した。

第5章では、300 Mega symbol per second (MSPS) で64APSK(4/5)を左右円偏波に用いて2.65 Gbps衛星通信を軌道上実証したことについて報告した。衛星搭載用送信機を小型化するためにJESD204Bという数Gbps級高速伝送プロトコルを採用した。また、耐振動性も考慮して局所的な発熱を有するFPGAやDACなどの部品用の放熱経路を設計した。熱雑音とクロストークを与えた信号を解析することで、熱雑音とクロストークを加法的に扱える結果が得られた。偏波分離器を極低温に冷やしても  $S$  パラメータの変動が小さかったことより搭載アンテナを冷やす熱設計を行った。送信機の信号品質を向上させるために三次歪の少ないバイアス点を探した。耐天候性を考慮してX帯を用いた。深宇宙通信帯との干渉を防ぐために三次歪の小さいバイアス点とBPFに注目した。また、耐雑音性のために誤り符号LDPCと周波数利用効率向上のために小さなコサインロールオフ係数 ( $\alpha = 0.05$ ) を有するDVB-S2X規格という放送静止衛星用の通信規格を太陽同期軌道の衛星で始めて採用した。直径10 mのカセグレン式パラボラアンテナと極低温の低雑音増幅器を用いて  $G/T = 39$  dBの地上局アンテナを開発した。地上局アンテナから500 m離れたところにある深宇宙通信用アンテナとのアップリンク7.1 GHzとの干渉を防ぐために挿入した直径24 mmの円形導波管フィルタにより、8.7 GHz付近に高次モードが生じた。DVB-S2Xはドップラの無い放送静止衛星向けの規格であるため、ヘッダが最大90シンボルと短いのでヘッダを用いたドップラ補正を複数回行った。本研究で開発した送受信アンテナのXPDは37 dBであり、大気伝播中の劣化も考慮したXPDの実測値は29.3 dBであった。この時、ITUの報告書から見積もられたXPDよりも3 dB良かった。また、実測値と回線計算の  $E_s/N_0$  の相違は3 dB程度であった。この通信システムにより、10分以内の1回のパスで100 Gbitと仮定したSAR画像を2機の人工衛星からダウンリンクする効率的な衛星運用が可能になった。