

## 論文の内容の要旨

論文題目 高い電力効率を持つデジタル無線中継システムの研究

氏名 中邨 浩

### 1 歴史的背景

1950年代の初めにマイクロ波の見通し内伝搬が電話用の基幹回線に使われ始めた。当時はアナログ FM システムが用いられた。その後 20 年に亘って FM システムは発達し、世界的に普及していった。その後交換機のデジタル化等の技術的な進歩があり、マイクロ波通信のデジタル化が望まれた。その要求に答えて、1960年代の終わりから 1970年代の初めにかけて、マイクロ波デジタル無線システムの実用化が始まった。当初のデジタル無線システムは 4 相 PSK が用いられたが、デジタル無線システムの実用化の開始と共に、伝送容量増大の要求から当初の 4 相 PSK から 8 相 PSK の開発へと進んで行った。しかし、位相面のみを用いて多値化を行うと、信号点相互の距離が近づきすぎるので、システムの雑音余裕の点からは振幅と位相を独立のパラメータとして用いた方が有利である。このようにして APSK の一形態である多値 QAM(Quadrature Amplitude Modulation)を変調形式として用いたシステムの開発が始まった。16QAM に始まる多値 QAM システムの研究開発は、64QAM、256QAM システムに進み、64QAM、256QAM システムは、まもなく実用化された。しかし、これらのシステムを開発してみると、その送信電力の大きさが問題となる事がわかった。256QAM のピーク電力は 4 相 QPSK の 225 倍であり、電力増幅器のバックオフまで考えると、送信機の消費電力は膨大となる。これを改善するため本論文では信号点配置をハネカムとして送信電力を低減する事を提案し、ハネカム

64APSK で 2dB、256APSK で 2.5dB の改善の可能性を指摘した。この論文の主題は、理論検討を活用し、ハネカム APSK による送信電力の低減を確認し、さらに、システムを試作し、有効性を検証することにある。

## 2 デジタル無線システム開発上の課題

本論分では次の3点について検討を行った。

- (1)フェーディングのない伝送条件下でシステムが十分良好な動作をするために要求される機器の設計精度や消費電力等を理論的に明らかにする。
- (2)周波数選択性フェーディングが発生した場合に耐歪特性を十分改善するために等化器に要求される性能を理論的に明らかにする。
- (3)ハードウェア設計上の課題に対処し、機器を試作し、性能を検証する。

### 2-1 機器の設計精度と送信電力低減効果の検討

多値 QAM は非常に高い精度を要求されるアナログシステムと云える。このため各サブシステムに割り当てられる劣化要因および劣化量を理論的に求めておくことは非常に重要である。ここでは下記2点について検討した。

- (a)消費電力を低減するハネカム APSK 方式の実現方法を提案し、これに対して機器劣化要因に対するパワー・ペナルティを計算し、設計精度の許容範囲を明らかにする。
- (b)提案したハネカム APSK の平均送信電力と電力増幅器の非線型歪によるパワー・ペナルティ等を検討し、送信電力の低減効果を明らかにする。

### 2-2 周波数選択性フェーディングに対する耐歪特性の改善

周波数選択性フェーディングに対する耐歪特性については、多値 QAM システムの開発でトランスバーサル等化器(TEQL)が有効であり、これにより瞬断率が著しく改善される事がわかった。本論文では QAM の手法を応用し瞬断率を計算した。その結果、ハネカム APSK の機器劣化に対するパワー・ペナルティが多値 QAM の場合と殆ど同じになるので、シグナチャーも殆ど変わらない事が予想される。それで、多値 QAM システムのシグナチャーとハネカム APSK システムのシグナチャーの実測値が一致すれば、多値 QAM に対する理論検討がそのまま使える事になる。そこで、TEQL を装備したハネカム APSK システムを開発し、シグナチャーを測定して、多値 QAM と一致する事を確認した。

### 2-3 ハードウェア設計上の課題

多値 QAM に比べハネカム型の信号点配置が少ない電力で同じ S/N を得られることから有効である事は分かっていたが、実用化された事は無い。その理由はキャリア再生が難し

くなる事とデータの識別再生が複雑になる事である。更に、グレー・コード化の方法も与えられていない。つまり、以下の3つの課題が残されていた。

- (a) ハネカム APSK システムのデータの識別再生方法
- (b) ハネカム APSK システムのキャリア再生方法
- (c) グレー・コード化の方法

### 3 本研究の位置付け

誤り率の理論的検討手法については、多値 QAM の研究を行っていた当時、特性関数法を改良して、計算時間を著しく短縮し、更に計算時間が変調レベルに無関係になるようにした。この方法を更に改良しハネカム APSK に適用できるようにした。更に、電力増幅器の非線型歪を含む場合の誤り率も評価できるようにした。この方法を用いて、(A) 多値 QAM 及び、ハネカム APSK システムの変復調器その他の機器劣化に依るパワー・ペナルティを理論的に明らかにした。更に、(B) 電力増幅器の非線型歪に対するパワー・ペナルティを理論的に評価し、要求されるバックオフがハネカム APSK の方が多値 QAM より小さく、低消費電力化が可能である事を明らかにした。また、(C) パイロット・キャリア注入法によるキャリア再生方法を用いる事で変復調器が簡単化出来る事を明らかにして、ハネカム APSK システムを開発可能とした。また、(D) ハードウェア構成上の課題を解決して、実際にこれを用いたシステムを開発した。

また、周波数選択性フェーディングについては、多値 QAM システムの開発を行ったときに、詳細な検討を行ったので、その結果を利用できるようにするため、TEQLを含むハネカム APSK システムを試作し、そのシグナチャーを測定した。その結果、ハネカム APSK システムのシグナチャーは多値 QAM のシグナチャーと殆ど変わらない事が分かった。従って、瞬断率の議論も多値 QAM に関するものがそのまま使える事になる。

(A) のパワー・ペナルティの評価方法は多値 QAM に対して筆者等のグループが開発した手法をハネカム APSK システムに適用できるようにしたものであり、新規性があるだけでなく計算精度、計算時間、適用範囲などで、既存の方法に勝ると考えられる。

また、(B) の非線型歪に対する誤り率、及びパワー・ペナルティの評価方法を与えた事で、ハネカム APSK システムの低消費電力化の可能性を数値的に示せるようにした。(C) で用いたパイロット・キャリア注入法は筆者が多値 QAM の開発の時に提案したものであるが、これをハネカム APSK に適用する事で、このシステムの実現を可能にした。ハネカム APSK の信号点配置が優れていることは、以前からわかっていたが、その複雑さからデジタル多重無線への適用は無理であろうと思われていた。しかし、パイロット・キャリア注入法を用い、更に積分制御でキャリア近傍の信号レベルを下げておけば、キャリア再生は単一キャリアをフィルターで抽出するだけとなり、信号点配置に依存せずに高い S/N の

再生キャリアが得られる。

また、こうして得たキャリアは絶対位相を与えるので、データの識別再生で必要となる3軸を合成する事が出来る。従って、パイロット・キャリア注入法はキャリア再生を可能にするだけでなく、識別再生も単純化でき、結果的にそれまで出来ないとされてきたハネカムAPSKシステムの開発を実現させた。つまり、ハネカムAPSKの開発自体に新規性があり、同時に、パイロット・キャリア注入法と組み合わせた事に新規性があると言える。

#### 4 本研究の意義と各章の概要

本論文は7章と付録から構成されている。第一章は序論であって、本論文の目的と位置付けをあたえる。

第二章では本研究に用いた解析手法について述べる。

第三章では変復調器を中心とした機器の劣化要因に対するパワー・ペナルティを評価し機器に要求される設計精度を明らかにする。

第四章では周波数選択性フェーディングに対する耐歪特性の評価を行い、システム・パラメータと耐歪特性の関係を明らかにする。

第五章ではハネカムAPSKによる低消費電力化について具体的に示す。初めにピーク電力、平均電力の改善効果を示し、次にグレー・コーディングの方法を説明し、最後に増幅器の非線型歪を含む場合の誤り率の計算方法を示し、これを用いて増幅器に必要なバックオフ量を決定する。このバックオフの評価によりハネカムAPSKの低消費電力化の総合評価が出来る。

第六章ではハネカムAPSKシステムの試作について述べる。ここではパイロット・キャリア注入法を用いて得られる利点を述べる。つまり、この方法を用いると再生キャリアが絶対位相を与えるが、これにより、信号処理部を改善すれば、通常の直交変復調器がそのまま使える事になる。この考え方で開発したモデモの特性を示す。つまり、第二章から第五章までの理論の実証として開発したシステムの特性の実測値を示す。

最後に、第七章で本研究の結論を述べる

また、第六章の検討でパイロット・キャリア注入法を用いたキャリア再生を述べたが、そこで、高いS/N比の再生キャリアを得る方法として採用した積分制御のキャリア近傍のスペクトル・パワーの抑圧効果を定量的に検討した結果を付録で述べる。