

解 説

I. デジタル陸上移動通信技術の現状と課題

笹岡 秀一*

(1990年7月20日受理)

I. PRESENT STATE OF TECHNOLOGY AND SUBJECT OF STUDY
IN DIGITAL LAND MOBILE COMMUNICATIONS

By

Hideichi SASAOKA

As the first part of this special issue on Digital Land Mobile Communications Technology, this paper outlines present state of technology for digital radio transmission in land mobile communications to assist in the understanding of various technical fields. Subjects of research are considered in connection with the particularity of land mobile communications, such as features of land mobile radio propagation, requests for efficient use of frequency, and communication service features. It is noted that the technology of digital radio transmission with a high bit rate, high performance and high spectral efficiency is a very important area of research.

The methods for efficient use of frequency, which aims at high spectral efficiency transmission, are classified and the explanation focuses on high spectral efficiency modulation methods such as QPSK and QAM. As to high performance transmission under fading situations, features of various methods to improve the bit error rate performance are discussed and more detail is given on the diversity method and error control techniques. Concerning high bit rate transmission, countermeasures to frequency-selective fading is outlined and the adaptive equalizer is explained.

1. はじめに

近年、情報社会の発展に伴い陸上移動通信の普及及び需要増加が著しい。そして、特に需要が急増している自動車電話及び MCA 陸上移動通信システム等では、デジタル方式の採用、準マイクロ波帯の使用等による新システムの導入が計画されている。また、欧米諸国においてもデジタル方式の実用化が計画中であり、実用化に向けて研究開発が盛んである⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾。例えば、デジタル方式自動車電話については、欧州の GSM システム、米国の TIA システムが実用化を計画中である。また、デジタル方式コードレス・携帯電話については、英国の CT-2 システムが商用化を計画中であり、欧州の DECT システム等が検討中である。このような状況か

ら、デジタル陸上移動通信に対する関心が高まっている。

しかし、このようなデジタル方式導入の具体化はごく最近のことであり、数年前までは、実用化はまだ先のことと考えられていた。無線通信分野におけるデジタル方式としては、衛星通信及び固定マイクロ波通信の分野で広く実用化されている。しかし、陸上移動通信においては、フェージング等の伝搬障害、周波数の逼迫などの特殊性のためデジタル方式の導入が遅れている。そして、実用化に当たり技術的にも解決すべき課題が多く残されていた。

そこで、通信総合研究所では、将来のシステム陸上移動通信の実現に技術的に寄与するため、研究開発を進めてきた。ここで、デジタル陸上移動通信技術は、各種の通信技術の総合であり、その範囲は広い。主要な技術

* 通信技術部 通信方式研究室

は、「交換、無線方式、端末機器及び部品」⁽⁴⁾や「電波伝搬、無線伝送、ハードウェア及び制御」⁽⁵⁾に分類されている。このうち、交換技術及び制御技術などは、電気通信事業者等が、ハードウェア技術などは、通信機製造業者が主体的に取り組むべき課題と考えられる。そこで、通信総合研究所においては、電波伝搬及び無線伝送の研究を主に行ってきた。

本特集号は、デジタル無線伝送技術に関する各種技術の研究結果をまとめたものである。そして、本稿では各個別技術に関する研究成果の報告に先立ち、各論文の位置付けを明らかにする意味も含めて、デジタル陸上移動通信技術の研究開発の現状と今後の課題について概説する。

2. デジタル陸上移動通信の技術的課題

2.1 陸上移動通信の現状とデジタル化の要請

近年、自動車社会及び情報社会の発展に伴い、陸上移動通信の需要が急増しているが、今後、高度情報社会の実現に向けデジタル通信需要が飛躍的に増加し、デジタル移動通信技術を採用した新方式の導入が必須となると思われる。

デジタル通信技術の導入の利点は、①各種のサービスに柔軟に対応できるシステムを構成できること、②誤り訂正符号化などの導入により受信側において特性改善が可能であること、③情報の秘匿・保護が容易なこと、④LSI化が容易で機器の小型・軽量化、低消費電力化に適していること等である。このため、デジタル通信技術は、有線通信網への適用が盛んであるが、固定マイクロ波通信や衛星通信などの無線通信分野においても一般的に用いられている。

このような利点は、陸上移動通信においても非常に有効であるが、今まで実用のデジタル通信方式は、警察無線等限られた分野でしか導入されていなかった。この原因は、①陸上移動通信においては、デジタル技術がアナログ技術に比べて十分に成熟していなかったこと、②陸上移動通信においては、デジタル通信の利点を発揮できる適用分野が未成熟であったこと、などである。このため、デジタル化の気運はあるものも、一般の陸上移動通信においては、従来のアナログ方式を変更するほどの力がなかった。そして、デジタル情報の伝送が必要な場合には、アナログ伝送路を用いたサブキャリア方式などで対処してきた。

ところが、最近では状況が変化し、デジタル方式の導入の気運が高まってきた。例えば、欧米におけるデジタル方式自動車電話システムの実用化の動きに呼応して、最近我が国においても実用化に向けての検討が急速

に進められており、数年後には実用となる計画である。また、欧州におけるデジタル方式コードレス電話の実用化の動きに呼応して、我が国においても実用化が検討されている。これにより、技術開発が加速するとともに他のデジタル陸上移動通信システムの導入も現実的となってきた。しかし、今後のデジタル化の進展は各種の移動通信業務により一様でなく、陸上移動通信の現状と将来展望及びそれに関連したデジタル化の要請の程度に依存すると考えられる。

陸上移動通信は、電気通信事業用と自営通信用に大別される。電気通信事業用には、自動車電話、無線呼出し、コードレス電話、列車公衆電話、テレターミナルなどがある⁽⁶⁾。一方、自営通信用には、警察用、消防用、及び電力・ガス・水道事業用等の公共業務用、並びに、各種の業務用自営通信、MCA 陸上移動通信システム、簡易な業務用無線、構内無線及びパーソナル無線など一般業務・個人用がある⁽⁶⁾。

陸上移動通信と将来動向を正確に予想することは難しいが、通信形態については、携帯無線の普及と各種移動通信サービスの統合化の方向に発展するものと考えられる。携帯無線の普及には、コードレス電話又は自動車電話からの発展形が考えられるが、これらにおいては、装置の小型軽量化、高機能化が必要である。これらはデジタル化に期待するところが多い。また、各種移動通信の統合化には、ISDN等の統合通信網への接続も考慮する必要がある。デジタル伝送の高速化・高品質化が前提となる。さらに、伝送情報については、一般に音声主体からデータ、ファクシミリ、画像へと多様化し、マルチメディア伝送の実現のためデジタル方式の導入が必須となる。

このように、一言でいえば、陸上移動通信サービスの高度化のためには、デジタル方式の導入が不可欠である。そして、サービスの高度化の要請が大きい陸上移動通信分野から、デジタル化が進展すると考えられる。

2.2 陸上移動通信の特殊性と技術的課題

ここでは、フェージング等の伝搬障害及び周波数の逼迫などの陸上移動通信の特殊性と関連づけて、デジタル化の技術的課題を示す。

2.2.1 陸上移動伝搬路の特徴

陸上移動通信においては、建造物からの反射などにより電波が多く経路を経て到来するため、干渉が発生し、無線機の移動に伴って受信信号の振幅及び位相が変動する現象、すなわち、マルチパス・フェージングが発生する⁽⁴⁾⁽⁵⁾。この振幅・位相変動に復調器が十分に対処できなくなると伝送特性が極端に劣化する。また、振幅変動により受信信号の信号対雑音比(SN比)が激減した場

合に集中的な誤り（バースト誤り）が発生し、平均 SN 比を増加させても誤り率特性の改善が十分にできない。また、伝搬経路による到達時間差（多重路伝搬遅延）が無視できなくなると、各信号波形間での干渉のため波形ひずみが発生するとともに、伝送路の周波数特性が一様でなくなる現象、すなわち、周波数選択性フェージングが発生する。この影響は、広帯域（高速）信号伝送において顕著となり、波形ひずみによって誤り率特性が極端に劣化する。

このように、デジタル陸上移動通信においては、フェージングによる誤り率特性の劣化が厳しいので、フェージング対策を施すとともに誤り率特性改善技術を適用して、良好な特性を確保することが課題である。

2.2.2 陸上移動通信における周波数の逼迫

陸上移動通信に利用可能な周波数帯域は、周波数が高くなると伝搬損失及びフェージング変動が増加するという障害のため、VHF 及び UHF 等の比較的低い周波数帯域に限られる。移動通信においては、当初、60 MHz 帯及び 150 MHz 帯が使用され、次に、400 MHz 帯が使用されるようになった。昭和40年以降、陸上移動通信の需要急増に対処するため、周波数帯域の狭帯域化、800 MHz 帯の利用開始、マルチチャネルアクセス方式の導入、周波数帯域の再狭帯域化を行ってきた⁽⁷⁾。また、現在では移動通信で未利用な周波数帯である 1~3 GHz 帯（いわゆる準マイクロ波帯）の実用化に向けて研究開発が進められている⁽⁸⁾。

準マイクロ波帯の開発によって、周波数の逼迫の解決が期待される。しかし、さらに高い周波数帯域の移動通信への使用がほとんど困難なことを考えると、長期的にみれば周波数の逼迫状況が再現するものと予想される。それゆえ、準マイクロ波帯の活用とともに周波数の有効利用が課題である。

2.2.3 陸上移動通信サービスの特徴と今後の期待

陸上移動通信の特殊性をサービス面からみると、①固定通信に比べ利用場所の制約が小さいこと、②固定通信に比べてサービス内容（伝送情報の種類等）が限定されること、③固定通信に比べ一般に通信費用が高いこと、などである。

サービスに関する今後の期待については、①項と関連してより利便性の高いサービスの提供がある。これについては、移動性を向上させて利便性を高めるために、無線機の小型、低消費電力化を図り、携帯化を進めることが課題である。また、②項と関連してサービスの高度化が期待されている。これについては、マルチメディア伝送や ISDN 移動サービスの実現のため、無線伝送の高速化、高品質化が課題である。さらに、③項と関連して

安価なサービスの提供が期待されている。このことが、潜在的な需要を呼び起こし、普及・発展に大きく寄与する。これについては、システム構成及びシステム運用などに工夫をして、システムの効率化を図り経済的システム構築することが課題である。

これらの課題のうち、経済的なシステム構築に必要な技術（例えば、交換・ネットワーク技術、ゾーン構成技術及び無線回線制御技術など）及び携帯化の実現に必要な移動機の小型化・低消費電力化などのハードウェア技術は、既に述べた理由により本稿では取り扱わない。そして以下では、無線伝送技術に関するもののみを取り扱う。

3. 周波数有効利用技術 一高能率化を目指して一

陸上移動通信においては、既に述べたように利用可能な周波数帯域が逼迫しているため、周波数有効利用が重要な課題である。このため、各種の周波数有効利用技術の研究開発が行われている。ところがデジタル伝送方式は、アナログ伝送方式に比べて必ずしも周波数利用効率が良くない。そこで、デジタル方式の実用化に当たっては、より一層の研究開発が期待される。

3.1 周波数有効利用技術の類型

陸上移動通信における周波数利用効率は、空間的利用効率、時間的利用効率及びスペクトル利用効率の積で表される⁽⁹⁾。ここで、空間的利用効率は、同一周波数の空間的再利用の効率、時間的利用効率は、各チャネルが実際に使用された時間率、スペクトル利用効率は、周波数帯域当たりの割当可能チャネル数である。そして、周波数有効利用技術は、それぞれの効率を向上させる技術に分類される。例えば、空間的利用効率に関しては、セルラ方式において同一周波数の再利用を効率的に行うゾーン構成技術がある。また、詳細なゾーン設計を可能にする電波伝搬特性の解明も利用効率向上に関係する。次に、時間的利用効率に関しては、チャネルをトラヒックに応じて効率的に共同利用するチャネル割当て技術がある。さらに、スペクトル利用効率に関しては、所要伝送速度を低減する帯域圧縮符号化技術、スペクトルを狭帯域化する高能率変調技術などがある。

一方、空間的利用効率及びスペクトル利用効率は、同一チャネル干渉及び隣接チャネル干渉の許容値により制約される。それゆえ、干渉問題を軽減（与干渉低減、被干渉許容能力の向上）する技術も周波数利用効率の低下を防ぐと言う意味から、周波数高度利用のために重要である⁽¹⁰⁾。被干渉許容能力向上に関しては、複数の受信信号の切替・合成により伝送品質の向上を計るダイバー

シチ技術、誤り率特性の向上を図る誤り制御技術、周波数間隔の縮小を可能とする隣接チャネル干渉除去技術などがある。また、与干渉低減に関しては、不必要な過大送信電力を低減する送信電力制御技術、隣接チャネル干渉を軽減する送信スペクトル整形技術などがある。

これらの周波数有効利用技術の多くは、その効果的な使用条件が、システムの形態、伝送情報の種類などに依存する。例えば、自動車電話及び携帯電話システムにおいては、セルラ方式及びマイクロセル方式による空間的な周波数再利用技術、並びに高能率音声符号化技術が効果的である。しかし、これらの技術は、単一ゾーンを使用して非音声伝送も行うシステムに対しては、有効でない。これに対して、高能率変調技術は汎用的な技術であるので、重要であるとともに期待も大きい。以下では、デジタル無線伝送技術に範囲を限定し、主に高能率デジタル変調技術を取り上げる。

3.2 高能率デジタル変調技術

陸上移動通信においては、①送信電力増幅器として電力効率の優れた飽和増幅器の使用が望ましいこと、②マルチパス・フェージングによる包絡線変動が厳しいこと等のため、振幅変動を伴う変調方式が実用的でなく、定包絡線変調方式が一般的であった⁽²⁾。定包絡線変調方式については、狭帯域化の研究が進められた結果、チャネル間隔 25 kHz において 16 kbit/s の伝送方式が開発されている。しかし、この程度では、音声伝送を対象とした場合に、FM 方式を用いたアナログ伝送方式に比べて周波数利用効率が劣っていた。そこで、さらに伝送効率を向上させるために、QPSK 等の線形変調方式の研究開発が進められた。そして、2 ビット/シンボルの高能率変復調技術の開発及び伝送速度が十数 kbit/s の高能率音声符号化技術の開発による、アナログ方式に匹敵する周波数利用効率の実現が可能となった。今後、周波数利用効率を格段に向上させるためには、高能率音声符号化技術の開発とともに 3 ビット/シンボル以上の高能率変調技術の開発が期待される。

3.2.1 定包絡線変調方式

定包絡線変調方式には、GMSK、4 値 FM、PLL-QPSK、Tamed FM などがある⁽²⁾。これらの方式は、占有帯域幅が狭く、帯域外のスペクトルも十分に抑圧されている。なお、狭帯域化のため、GMSK 及び Tamed FM 方式はパーシャルレスポンスの手法を、一方、4 値 FM 及び PLL-QPSK 方式は多値化の手法を用いている。これらの変調方式には、一長一短があり、簡単に優劣を論じることは難しい。しかし、欧州の GSM により実用化が検討されているデジタル方式自動車電話システムにおいて、採用されることになっている GMSK

方式が代表的なものである。

今後さらに伝送効率を高めるには、パーシャルレスポンスあるいは多値化をさらに進める必要があるが、誤り率特性の劣化を伴うことが問題である。誤り率特性をあまり劣化させないで狭帯域化を行う技術の開発は、今後の検討課題である。

3.2.2 線形変調方式

定包絡線変調方式では、チャネル間隔 25 kHz において伝送速度 16 kbit/s の方式が開発されたが、2 倍の伝送速度 (32 kbit/s) の実現はかなり困難な状況である。ところが、線形変調方式⁽²⁾では、非線形増幅器を使用できない欠点があるが、伝送効率をさらに高める可能性がある。例えば、QPSK などの 2 ビット/シンボルの変調方式を用いて、帯域制限等を理想的に行えば、チャネル間隔 25 kHz で 32 kbit/s の伝送も可能である。さらに、隣接チャネル干渉の許容値の規定を見直せば、約 40 kbit/s の伝送も可能となる。

線形変調方式としては、現在のところ $\pi/4$ シフト QPSK 方式が最も注目されている。この方式では、通常の QPSK 方式の場合に比べ包絡線変動を減少させるため、奇数ビットと偶数ビットに対し $\pi/4$ シフトした四つの信号点配置を用いている。この方式では、包絡線が一定でないため送信電力増幅器の非線形性の補償が重要となる。この方式の位相変化は、 $\pm \pi/4$ 、 $\pm 3\pi/4$ となるので、復調には、位相検波（周波数検波+積分放電回路）が可能で、性能は 4 値 FM 程度である⁽²⁾。なお、遅延検波方式による復調も可能である。この変調方式は、北米及び日本で実用化が計画されているデジタル方式自動車電話システムで採用されることになっており、現在、研究開発が盛んである⁽²⁾。

線形変調方式の電力効率が悪い問題については、①効果的な非線形補償技術の開発、②電力効率の良い線形増幅器の開発により解決されるものと考えられる。

3.2.3 陸上移動通信用多値直交振幅変調方式

直交振幅変調 (QAM) 方式は、固定マイクロ波通信で実用化されているが、陸上移動通信への適用においては解決すべき技術的課題は多いため、その実用化は遠い将来であるとの見解も多い。しかし、陸上移動通信用の方式が開発されればその効果は大きい。例えば、16 QAM 方式を用いた場合、1 Hz 当たり 4 bit/s の伝送が可能となり、仮に符号化率 3/4 の誤り訂正方式を適用しても、1 Hz 当たり 3 bit/s の伝送が可能となる。

陸上移動通信における 16 QAM 方式の実用化の鍵は、フェージングによる振幅・位相変動の効果的な補償方式の開発である。固定マイクロ波通信における 16 QAM 方式では、AGC と基準搬送波再生により振幅・位相変

動に対処している。また、振幅・位相変動補償がより厳しくなる 256 QAM 方式では、パイロットキャリア注入方式により、振幅・位相変動の補償を行う方式が提案されている⁽¹¹⁾。これらの方式は、搬送波再生のループ帯域幅が非常に狭く設定されるため、固定マイクロ波回線のようにフェージング変動が緩やか場合に有効であるが、陸上移動通信への適用が難しい。

陸上移動通信においては、基準搬送波の再生が難しいので、送信側で情報シンボルの間に周期的にパイロットシンボルを挿入し、受信側では準同期検波の後の複素ベースバンドにおいて、パイロットシンボルを基準として振幅・位相変動補償を行う方式が提案されている⁽¹²⁾。そして、提案方式を 16 QAM に適用すると、十分に良好な特性が得られている⁽¹³⁾。また、パイロットキャリア注入方式において、受信側での抽出を容易にするために、TTIB 方式等の提案が行われている⁽¹⁴⁾。今後、多値 QAM 方式における振幅・位相変動補償方式と研究開発が期待される。

3.3 隣接チャネル干渉軽減技術

周波数有効利用を図るためには、限られた帯域に多数のチャネルを密に配置すること、即ち、チャネル間隔を狭くすることが必要となる。このためには、変調スペクトルを狭帯域化する技術とともに、隣接チャネルとのスペクトル重なりを許容できるように、隣接チャネル干渉軽減技術も重要である。陸上移動通信における隣接チャネル干渉の特徴は、①システムの運用形態によっては、いわゆる遠近問題が発生すること、②一般に、希望波と非希望波が独立にマルチパス・フェージングの影響を受けることである。このため、隣接チャネル干渉波のレベルが希望波に比べて極度に大きくなることもある。それゆえ、帯域フィルタによる干渉抑圧効果のみでは、チャネル間隔をある程度広くしないと十分な干渉保護比が得られない。この対策として、隣接チャネル干渉波除去技術が提案されている⁽⁹⁾。また、送信電力制御技術の併用も有効である。更に、システム設計上の課題として、隣接チャネル干渉保護比をどの程度確保するかについての総合的な検討と基準の見直しが必要かもしれない。

4. 伝送特性改善技術 一高品質化を目指して一

陸上移動通信においては、既に述べたようにフェージングのために十分な伝送品質の確保が難しいので、フェージング対策技術及び伝送特性改善技術の適用が重要である。

4.1 フェージング対策・特性改善技術の類型

アナログ伝送の場合には、フェージング環境下における伝送特性の改善のために、ダイバーシチ技術の適用が

一般的である。デジタル伝送の場合にもダイバーシチ技術が効果的であるが、さらに、誤り制御技術などデジタル特有の技術も有効である。デジタル無線伝送におけるフェージング対策・特性改善技術には、①フェージングに伴う復調器の動作不良（軽減困難誤り発生原因）に対処する技術、②フェージングのためにあまり良好でない SN 比対誤り率特性を改善する技術、に大別される。

陸上移動通信における軽減困難誤りの発生原因としては、一様フェージング下における位相変動、多重路伝搬の遅延時間差による符号間干渉（選択性フェージングによる伝送路ひずみ）がある。位相変動の影響は、フェージング変動速度が速いほど顕著となる。また、位相変動の影響は、同期検波方式においてより厳しい。そこで、陸上移動通信においては、遅延検波及び周波数検波方式が採用されることが多い。しかし、同期検波方式の採用を前提とする場合には、位相変動に十分に追従する搬送波再生技術又は位相変動補償技術が必要となる⁽¹⁵⁾。さらに、多値直交変調方式の場合には、振幅・位相変動補償技術が必要となる⁽¹²⁾。

選択性フェージングによる軽減困難誤りは、信号伝送速度が速くなるほど顕著となる。この対策としては、符号干渉の影響を補償する適応等化技術などがある⁽¹⁶⁾⁽¹⁷⁾。また、遅延波が存在しても復調器の動作不良による誤りの発生を押さえるように、変調及び復調に工夫をした耐多重波変調復調方式がある⁽²⁾。また、スペクトル拡散方式の一種である直接拡散変調方式は、遅延波の分離による除去及び合成が可能となる有効な方式である。これらの技術では、遅延波による劣化を軽減するばかりでなく、遅延波が適切に処理されているため、さらに一種のダイバーシチ利得が得られる⁽¹⁸⁾。

一方、フェージング下における SN 比対誤り率特性を改善する技術としては、複数の受信信号の切替・合成により特性改善を図るダイバーシチ技術、発生した誤りを訂正して特性改善を図る誤り制御技術等がある。また、ダイバーシチに類似な技術として、周波数ホッピング技術やアダプティブ・アレーアンテナ技術がある⁽¹⁸⁾。これらの誤り率特性改善技術は、一様フェージングに有効であるばかりでなく、選択性フェージングに対しても有効な技術である。

フェージング対策技術を周波数有効利用の観点からみると、受信側でのみ対処する技術においては、その対策によって周波数利用効率（特に、スペクトル利用効率）が低下することはない。このような技術に、空間ダイバーシチ、適応等化などがある。一方、送信側でフェージング対策のための何らかの処理を行うものは、一般に、ス

ペクトル利用効率が大きく低下する。このような技術に、周波数及び時間ダイバーシチ、スペクトル拡散、耐多重波変調、誤り訂正などがある。しかし、自動再送要求方式や低速周波数ホッピングなどで、スペクトル利用効率をあまり低下させない方式もある。

以下では、一様及び選択性フェージングの両方に有効な汎用的な技術を取り扱い、選択性フェージングに対してのみ有効な技術を次章で取り扱う。

4.2 ダイバーシチ技術⁽¹⁸⁾

ダイバーシチ技術とは、複数の受信信号の切替、合成等を行うことにより信号品質の向上を図る技術である。ダイバーシチ技術は、ダイバーシチブランチに何をを使うかによって、以下のように分類できる。

①空間ダイバーシチ

空間位置の異なる複数アンテナで受信する方式である。陸上移動通信で最も一般的な方式である。

②周波数ダイバーシチ

信号を周波数の異なる複数波を用いて伝送し、複数波を受信する方式である。周波数相関が小さい（選択性フェージングが厳しい）程その効果大きい。

③角度ダイバーシチ（指向性ダイバーシチ）

指向方向の異なる複数アンテナで受信する方式である。指向性による遅延波の抑圧効果も期待できる。

④偏波ダイバーシチ

偏波の異なる（例えば、垂直と水平）複数アンテナで受信する方式である。

⑤時間ダイバーシチ

信号を異なる時間に複数回送信して、複数回受信する方式である。移動局の停止時に効果が少ない。

また、ダイバーシチ技術には、適用する部分により移動局及び基地局ダイバーシチなどがある。更に、シャドウイング対策として、複数の基地局による送信及び受信ダイバーシチもある。

以上のダイバーシチのうち、受信側でのみ対処する方式、すなわち、空間、角度及び偏波ダイバーシチは、複数の受信アンテナが必要となるが、周波数帯域を増加させないで高品質化が可能となるので、周波数利用効率の点で優れている。一方、送信側での処理が必要な方式、すなわち、周波数及び時間ダイバーシチは、複数の受信アンテナが不要であるが、高品質化と引換に周波数帯域が増加するので、前者に比べて周波数利用効率が格段に悪くなる。

また、ダイバーシチ技術は、受信信号の合成の方式によって、選択合成、等利得合成、最大比合成などに分類され、制御方式にも各種のものがある。最大比合成法は、合成後の SN 比が最大となるように、各ブランチをそ

れぞれの SN 比で重付けする方式であり、特性が最も優れている。しかし、各ブランチの SN 比と位相を求める必要があるため、回路構成が複雑となる。このため、一般に実用的な方式でない。一方、選択ダイバーシチは、合成を行わず最も良好なブランチを選択する方式であり、最大比合成法に比べ特性改善が多少小さい。しかし、回路が比較的簡単なため、一般によく用いられる方式である。選択切替えの基準としては、包絡線レベルを用いるのが簡単であるが、干渉波が存在する場合などに必ずしも最良のブランチを選択できるとは限らないことが問題である⁽¹⁸⁾。

ダイバーシチ技術の今後の研究課題の一つとしては、選択性フェージングへの適用に関するものがある。ダイバーシチ技術は、選択性フェージングの対策としても有効であるが、その効果はダイバーシチの構成及び制御方式などに依存する。一様フェージング下では SN 比最大とする制御が最適であるが、選択性フェージング下では、符号間干渉を最小にするような制御アルゴリズムが重要となる⁽¹⁷⁾。また、選択性フェージングを対象にした適応等化器付きダイバーシチ方式の検討が行われている⁽¹⁹⁾。また、その他の今後の研究課題としては、単独のダイバーシチ技術では十分な特性改善が得られない場合に、複数のダイバーシチ技術の組合わせ特性に関するものがある。また、他の誤り特性改善技術、例えば、誤り訂正技術との組合わせ特性に関するものなどがある。

4.3 擬似ダイバーシチ技術

周波数ホッピング技術は、複数の周波数を同時に送受信しない点が周波数ダイバーシチと異なるが、周波数ダイバーシチ効果を活用するところが、周波数ダイバーシチと類似している。また、アダプティブ・アレーアンテナ技術は、制御アルゴリズムなどがダイバーシチと若干異なるが、その構成が空間ダイバーシチに、その機能が指向性ダイバーシチに類似している。

4.3.1 周波数ホッピング技術

周波数ホッピングは、一定の時間間隔とパターンで送信周波数を切り換える技術である。この方式は、複数の周波数ブランチを受信側で選択する方式でないため、厳密な意味でダイバーシチでない。周波数ホッピングは、スペクトル拡散通信の一種である高速ホッピング方式と搬送周波数の時間的な変更と考えられる低速ホッピングとがある。1ビット区間で複数回の周波数切替えを行う高速ホッピング方式では、大きなダイバーシチ効果が期待されるものの、周波数帯域が広がる問題がある⁽¹⁸⁾。

一方、ビット伝送速度に比べて十分に低速で切替える方式では、周波数帯域はあまり広がらない⁽¹⁸⁾。この場合に、同一周波数区間内での閉じた処理では、ダイバー

シチ効果が得られない。そこで、誤り訂正符号化などで信号に冗長性と相関を持たせ、さらにインタリーブによりホッピングの数周期分に信号を分散させることにより、実効的にダイバーシチ利得を得ている。欧州の GSM システムでは、4 周波のホッピングを周波数分割型の TDMA 方式に適用し、周波数利用効率を劣化させないで良好な特性を得ている。

4.3.2 アダプティブ・アレーアンテナ技術

この技術は、各アレーの合成重みを変化させることにより、アンテナの指向性を適応的に制御する技術である。正確にはダイバーシチでないが、空間及び指向性ダイバーシチと類似点がある。アダプティブ・アレーアンテナを用いると希望波と到来方向の異なる干渉波の除去が可能であるので、干渉波の一種とみなせる遅延波にも同様の効果を期待できる。しかし、遅延波は干渉波と異なり希望波と相関のある場合があるので、その場合には若干様子が異なる。例えば、この技術の一種フェージング下での動作は、制御アルゴリズムにも依存するが、SN 比を最大にする制御の場合には、最大比合成ダイバーシチとして動作する。

アダプティブアレーの制御アルゴリズムには、LMS (Least Mean Square) など各種のものがあるが、GMSK 方式などの定包絡線変調方式に対しては、CMA (Constant Modulus Algorithm) が有効である⁽²⁰⁾。CMA は、LMS アルゴリズムの変形であり、希望信号が定包絡線信号であるときのみ適応可能である。

陸上移動通信における選択性フェージング対策をさらに進めたものとして、適応等化技術との組み合わせ方式が検討されている。

4.4 誤り制御技術

誤り制御技術には、FEC (誤り訂正符号化)、ARQ (再送方式) 及びそのハイブリッド方式などがある。この技術は、デジタル通信方式の誤り特性改善によく用いられる技術であるが、マルチパス・フェージング対策技術としても有効である。また、他の対策技術との併用も効果的である。

誤り訂正符号は、ブロック符号と畳込み符号に大別される。ブロック符号には、①BCH 符号などのランダム誤り用と、②ファイア符号などのバースト誤り用がある。また、畳込み符号にも、①ビタビ復号による畳込み符号化などのランダム誤り用と、②ハーゲルバーガー符号や岩垂符号などのバースト誤り用がある。一方、自動的に再送を行う ARQ 方式は、データ通信において採用されることが多い。

誤り制御技術の選定に考慮すべきものに、伝送回線の種類、伝送情報の種類、伝送遅延の許容量、経済性等が

ある。陸上移動通信では、マルチパス・フェージングの影響により、バースト性誤りが発生する。このため、バースト誤り訂正符号として、符号化・復号が比較的容易なハーゲルバーガー符号がよく用いられる。しかし、この符号は、符号化率が低いことが欠点である。一方、バースト誤り訂正符号を用いない方法として、バースト誤りをランダム化するインタリーブとランダム誤り訂正符号の組合せも効果的である。この場合に、ビタビ復号による畳込み符号を用いると誤り訂正能力が高いが、符号化率が高い場合に装置が複雑となることが欠点である。また、バースト誤りに比較強く、ランダム誤りにも比較的良好な特性が良好な、リード・ソロモン符号がある。

陸上移動通信における誤り制御方式としては、FEC 方式が一般的であるが、誤り訂正後の誤り率特性が十分でない場合 (音声伝送の場合よりデータ伝送の場合に多い) に、FEC 方式と ARQ 方式を組み合わせたハイブリッド ARQ 方式の採用が有効である。

また、陸上移動通信における多値変調方式の研究の進展に伴い、最近、注目されている方式に符号化変調方式がある⁽²¹⁾。誤り訂正符号化では、一般に誤り率特性改善の代償として周波数帯域が拡大する。それゆえ、多値変調方式への適用に当たっては、多値変調による帯域縮小効果をあまり損わないで、誤り率特性を改善することが課題である。このような課題の解決のためには、変調と一体化した誤り訂正方式、すなわち、符号化変調方式が有効である。符号化多値変調方式の代表的なものにトレリス符号化変調方式がある。この方式では、 2^{n+1} 値 QAM と符号化率 $n/n+1$ の畳込み符号を組み合わせ、ビタビアルゴリズムによって復号する。また、多値化に伴って誤り率特性が劣化するのを避けるために、信号点間の最大ユークリッド距離が等価的に拡大するように、信号点配置及びデータ判定法を工夫している⁽²²⁾。

誤り訂正技術における今後の研究課題としては、①誤り訂正と変調を一体化した方式に関するもの、②誤り訂正技術と他の特性改善技術との組み合わせ効果に関するもの、③伝送路変動に適応した誤り制御技術に関するもの等がある。③項については、包絡線レベルで重み付けした軟判定方式などがある。

5. 選択性フェージング対策 —高速化を目指して—

現在、実用化が計画されているものは、比較的狭帯域なデジタル陸上移動通信方式が多いが、当面のデジタル通信需要に十分対応できると考えられる。しかし、今後の情報社会の発展に伴い、陸上移動通信の分野においても、デジタル通信の高度化が要請される。具体的

には、①画像など高速データの伝送、②マルチメディア伝送、③ISDN など統合通信網との接続、④システムの効率的運用のために多重数が多い時分割多元接続 (TDMA) 方式の導入などが期待される。それゆえ、将来的には広帯域ディジタル陸上移動通信方式の導入が期待されるが、その実現のためには、周波数選択性フェージング対策技術が不可欠となる。

5.1 各種の選択性フェージング対策技術

広帯域ディジタル伝送においては、多重波の遅延時間差による符号間干渉 (選択性フェージング) の影響が無視できない。そして、符号間干渉によりアイ開口が閉じる現象及び横ずれする現象により、誤り率が劣化する。この対策としては、適応等化技術が代表的のものであるが、その他に耐多重波変調技術、スペクトル拡散技術、ダイバーシチ技術、アダプティブアレー技術、マルチキャリア伝送技術などがある⁽¹⁷⁾。

適応等化技術は、時変化する伝送路ひずみを適応的に補償する技術であり、ディジタル伝送における符号間干渉を軽減するのに有効である。この技術は、固定マイクロ波通信における選択性フェージング対策技術として実用化されている。この技術を多重波の伝搬遅延差に起因する符号間干渉を除去する目的で、陸上移動通信に適用する場合の課題は、数十 Hz 程度の周波数成分を含む伝搬特性の時間変化にตอบสนองする工夫 (例えば、等化アルゴリズムの高速化など) である。また、適応等化器は、一般に回路規模が大きくなることが問題である。

耐多重波変調方式は、①符号間干渉によりアイ開口の閉じる現象が、1 ビット区間全部に及ばず補完的となるような工夫、②符号間干渉の影響が隣接ビットに影響しにくい工夫などを行った変調方式である。現在、各種のものが提案されているが、代表的な DSK 方式は、データの 1, 0 に対応して、 $\pm \pi/2$ の位相シフトを 2 回行う変調方式である。多重波に強くなる原理を簡単に説明することは難しいが、多少の不正確さを許すなら、符号間干渉の影響が 1 ビット区間内で補完的に表れるため、符号間干渉に強くなるといえる。耐多重波変調方式は、一般に周波数利用効率が良くないことが欠点である⁽²⁾。

スペクトル拡散技術のうち直接拡散変調方式は、遅延波の分離、合成によるダイバーシチ利得が期待できる。周波数ホッピング方式は、個々の時間内では狭帯域な信号であるので、選択性フェージングの影響を受け難いとともに、周波数ダイバーシチ効果が期待できる。しかし、一般に周波数利用効率が低下することが問題である。アダプティブアレー技術及びダイバーシチ技術は、既に述べたように一様フェージング対策として有効であるとともに、選択性フェージング対策としても有効である。ま

た、選択性フェージング用の工夫をした方式も提案されている。

マルチキャリア伝送⁽²³⁾ は、送信すべきデータを周波数の異なる複数のキャリアに分配して伝送する方式である。単一キャリアで伝送した場合に、伝送帯域が広帯域となり選択性フェージングの影響が顕著となるのに対して、マルチキャリア伝送では、各キャリアの帯域が狭帯域となり、当然のことながら周波数選択性フェージングの影響をあまり受けない。マルチキャリアの送信及び受信を簡略化する工夫をしないと、装置規模が大きくなることが欠点である。

5.2 適応等化技術

適応等化器には各種のものがあるが⁽²⁴⁾、陸上移動通信を対象としたものは、タップ付き遅延線を用いた等化器 (トランスバーサル型等化器) と最尤復号法を用いた等化器 (ビタビ等化器) に大別される。トランスバーサル型等化器には、入力信号の時間遅延、重み乗積、加算等の線形演算のみを行う線形等化器と入力信号以外に等化器出力と判定値も用いる非線形等化器 (判定帰還適応等化器) がある。現在、陸上移動通信用の適応等化器としては、判定帰還適応等化器やビタビ等化器が有力である。また、TDMA システムを想定したバーストへの適用を前提とした方式の検討が積極的に進められている。

判定帰還適応等化器は、判定値を帰還して時間遅延、重み乗積、加算等を行う点に特徴がある。この方式は、判定値の帰還により遅延線の段数を減少できるので、装置規模が比較的小さく、特性が良好である。タップ利得の算出には、最大傾斜法やカルマンアルゴリズムが用いられる。また、参照信号としては、等化器出力の判定信号が用いられるが、初期設定においてトレーニング信号が用いられることもある。

一方、ビタビ等化器は、伝送路のインパルス応答と送信シンボル系列の畳込み状態となる受信信号から、送信シンボル系列をビタビアルゴリズムにより最尤推定する方法である。この等化器は、はじめにバースト内に挿入したトレーニング系列を用いて、各シンボルの畳込みの状態 (伝搬路特性) を推定する。次に、伝搬路特性推定値を用いて、ビタビアルゴリズムによって送信シンボル系列の最尤指定を行う。ビタビ等化器は、動作の安定性、等化特性などの点で優れており、欧州の GSM システムでの使用が検討されている。しかし、ビタビ等化器では、伝送速度が高くなり符号間干渉の範囲が増加する場合及び多値変調方式のようにシンボル当たりの状態数が多い場合には、ビタビ推定において考慮すべき状態数が急速に増加するので、装置化が現実的でなくなるという欠点がある。

このような課題の解決法として、遅延判定帰還型最尤復号法 (DDFSE: Delayed Decision-Feedback Sequence Estimation) が提案されている⁽²⁵⁾。この方式は、最尤推定において考慮するインパルス応答の範囲を限定し、推定する状態数の増加を抑えることにより、簡易化を図る方法である。そして、無視したインパルス応答部分による等化特性の劣化を、ビタビ等化器のパス履歴情報から得られる判定値を帰還して、低減する。

DDFSE は、高速伝送及び多値変調方式への最尤復号法の適用に有効であるが、伝送路特性の推定値を一定としているため、伝搬路特性の変動が速い陸上移動通信にそのまま適用することが難しい。その対策として、伝搬路特性の推定を TDMA バーストの前後で行い、二つの推定値から一次内挿によりその間の特性を推定する方法がある⁽²⁶⁾。

6. ま と め

デジタル陸上移動通信技術特集号の冒頭にあたり、以下の、「Ⅱ. 陸上移動伝送路の特徴と課題」、「Ⅲ. 一様フェージング対策及び干渉対策」、「Ⅳ. 高能率多値変調技術」、「Ⅴ. 広帯域デジタル伝送技術」、「Ⅵ. 誤り系列特性と誤り制御技術」、「Ⅶ. 技術開発支援評価システム」の各論文の位置付けを明らかにする意味を込めて、陸上移動通信の研究開発の現状と課題について概説した。

デジタル陸上移動通信の技術的課題に関しては、陸上移動通信の現状とデジタル化の要請について概説した後、陸上移動伝搬路特性、周波数の逼迫、陸上移動通信サービスの特徴など陸上通信の特殊性と関連付けて技術的課題について説明した。

高能率化を目指した周波数有効利用技術に関しては、技術の種類について概説した後、高能率デジタル変復技術を取り上げて、定包絡線変調技術、線形変調技術及び多値直交変調技術の現状と課題を説明した。また、隣接チャネル干渉軽減方式について若干ふれた。

高品質化を目指した伝送特性改善技術に関しては、技術の種類について概説した後、一様及び選択性フェージング対策として有効なダイバーシチ技術、擬似ダイバーシチ技術及び誤り制御技術を取り上げて、その現状と課題を説明した。

高品質化を目指した選択性フェージング対策技術に関しては、技術の種類について概説した後、対策として代表的な適応等化技術を取り上げて、判定帰還適応等化器及びビタビ等化器などについて現状と課題を説明した。

謝 辞

デジタル陸上移動通信技術に関する研究プロジェクト

の推進に当たり、御指導・御支援を頂きました中津井総合研究官（前通信技術部長）に感謝致します。また、本解説をまとめるに当たりご協力頂いた三瓶主任研究官に感謝致します。

参 考 文 献

- (1) 古谷之綱, “欧米におけるデジタル移動通信研究の動向”, 信学技報, RSC89-23, pp. 29~32, 1989年10月.
- (2) 赤岩芳彦, 移動通信のためのデジタル変復調技術, トリケプス出版, 平成2年3月.
- (3) 古谷之綱, 移動通信の概要 (第一章), 移動通信のデジタル化技術 (河野隆二監修), トリケプス出版, 1990年4月.
- (4) 森永隆広監修, 移動通信—理論と設計—, 電子通信学会, 1972年3月.
- (5) 奥村善久, 進士昌明監修, 移動通信の基礎, 電子通信学会, 昭和61年10月.
- (6) 移動通信システムハンドブック (1989年版), 財電波システム開発センタ, 平成元年6月.
- (7) 移動通信における準マイクロ波帯の利用に関する調査研究会報告書, 移動通信における準マイクロ波帯の利用に関する調査研究会 (郵政省電気通信局電波部計画課), 昭和63年4月.
- (8) 準マイクロ波帯移動通信用周波数開発のあらまし, 電波資源開発利用に関する調査研究会編, 財電波システム開発センター, 平成元年6月.
- (9) 三瓶政一, “Ⅱ-3 変復調技術による周波数有効利用技術”, 通信総研季, 37, 1, pp. 29-38, 1991年2月.
- (10) 周波数高度利用技術の開発に関する調査研究報告書, 電波資源開発利用に関する調査研究会 (郵政省電気通信局電波部計画課), 平成元年3月.
- (11) Y. Takeda et. al., “Performance of 256 QAM modem for digital radio system”, Globcom '85 pp. 47. 2. 1-47. 2. 5 1985.
- (12) 三瓶政一, “陸上移動通信用 16 QAM のフェージングひずみ補償方式”, 信学論 (B II), J72-B II, 1, pp. 7-15, 1989年3月.
- (13) 三瓶政一, 笹岡秀一, 神尾享秀, 須永輝己, “陸上移動通信用高能率デジタル変調方式の開発”, 第76回通信総研研究予稿, pp. 13-28, 平成元年5月.
- (14) P.M. Martin, A. Batemen, J.P. McGeehan and J.D. Marvill, “The implementation of a 16 QAM mobile data system using TTIB based fading correction techniques”, 38th IEEE Veh. Tech. Conf., pp. 71-76, June 1988.

- (15) 三瓶政一, 移動体通信への応用 (第5章), デジタル PLL の基礎と応用 (畑雅恭監修), トリケプス出版, 平成2年7月.
- (16) 三瓶政一, 適応等化器 (第4章), 移動通信のデジタル化技術 (河野隆二監修), トリケプス出版, 1990年4月.
- (17) 服部 武, 鈴木 博, “高速デジタル移動通信における技術的諸課題”, 信学技報, RCS88-67, pp. 7-12, 1989年3月.
- (18) 古谷之綱, ダイバーシチ技術 (第5章), 移動通信のデジタル化技術 (河野隆二監修), トリケプス出版, 1990年4月.
- (19) 渡辺孝次郎, “マルチパス伝送路における適応受信方式”, 信学技報, CS78-203, 1979年2月.
- (20) 大鐘武雄, “アダプティブアレーによる多重伝搬路歪の補償”, 第74回通信総研研究予稿, pp. 80-92, 昭和63年5月.
- (21) 神尾享秀, “陸上移動通信におけるトレリス符号化変調方式の特性”, 信学論 (BII), J72-B-II, 1, pp. 509-510, 1989年9月.
- (22) G. Ungerboeck, “Channel coding with multi-level/phase signals”, IEEE Trans. Inf. Theory IT-28, 1, pp. 55-67, Jan. 1982.
- (23) J.A.C. Bingham, “Multicarrier modulation for data transmission: an idea whose time has come”, IEEE Commun. Mag. 28, 5, pp.5-14, May 1990.
- (24) 三瓶政一, “デジタル陸上移動通信のための適応等化器”, 電波研季, 33, 167, pp. 93-130, June 1987.
- (25) A. Duel and C. Heegard, “Delayed decision-feedback sequence estimation”, IEEE Trans. Commun., 37, 5, pp. 428-436, May 1989.
- (26) 岡田 実, 三瓶政一, “遅延判定帰還型最尤復号法 (DDFSE) による陸上移動通信の周波数選択性フェージング補償特性”, 信学技報, RCS89-54, pp.43-48, 1990年1月.

