

スペクトル拡散陸上移動通信の研究動向と展望

水野光彦*

(昭和61年6月19日受理)

AN OVERVIEW OF RESEARCHES AND APPLICATIONS ON SPREAD-SPECTRUM MOBILE COMMUNICATIONS

By

Mitsuhiko MIZUNO

Interests in the application of spread-spectrum (SS) techniques to the land mobile communications have increased for the last 10 years, and studies have been pursued in various countries. The members of Radio Research Laboratory including the author also developed experimental equipments, and have reported the results in some publications.

Nowadays, these techniques have become familiar to many engineers, and are entering on a new phase of practical use. Its typical example is an authorization of civil uses of spread spectrum by FCC.

This paper summarizes the researches and applications on the SS mobile radio. It also refers to important points on the concept of SS techniques.

In this paper, Chapter 2 describes the features of the SS techniques, and Chapter 3 presents the development attained until now. Chapter 4 systematically describes the research on the application to mobile communications. Chapter 5 explains code-division multiple-access and spectral efficiency of SS mobile radio. Chapter 6 introduces SS packet mobile radio, and Chapter 7 describes the applications to indoor data communications, which are considered one of the most useful fields for the SS. In the following chapter, the trend of FCC concerning the SS is shown, and finally, the future view is presented.

1. はじめに

スペクトル拡散 (Spread-Spectrum: SS) 方式の陸上移動通信への適用性についての関心は、約10年前から、非常に高まり、各国で研究が活発になった。筆者らも室内及び野外実験用の装置を開発し、様々な実験を行ってきた。これらの成果は、本誌をはじめ、様々な機会に発表している。そして、現在では、この方式は広く一般に知られるところとなり、FCCにおける民間使用の認可に見られるように、新たな実用段階に入っている。

本稿では、理論面を中心に、SS方式の陸上移動通信

への応用についての研究の歩みと、今までに得られたSS方式の評価をまとめる。また、必要に応じて、SS方式の一般的な課題も説明する。SS方式の解説は、既に数多い。例えば、単行本として文献(1)~(3)が、一般的な解説記事では文献(17)~(23)、移動通信に限っては文献(42)~(47)、などがある。しかし、SS方式のとらえ方は、研究の進展と周辺技術の発達につれて変化してきている。さらに、実験結果やハードウェアの技術レベルを踏まえた解説はほとんどなく、ここで本稿にまとめることにも意味があるものと考えられる。

2. では、SS方式の特徴を紹介する。3. では、現在までのSS方式の発展を概説し、4. では、この方式の陸上移動通信への応用についての内外の研究成果を系統

* 総合通信部 通信系研究室

的に紹介する。5. では、陸上移動通信への応用を考える上で、特に注目すべき符号分割多重化の特徴とスペクトル利用効率について詳しく述べる。また、6. では、SS パケット移動通信の現状を紹介する。7. では、SS 移動通信の有効な利用法の一つとして最近注目されてきた、構内移動通信への応用について述べる。次に、FCC の SS 方式の認可の動きを紹介し、最後に将来を展望する。

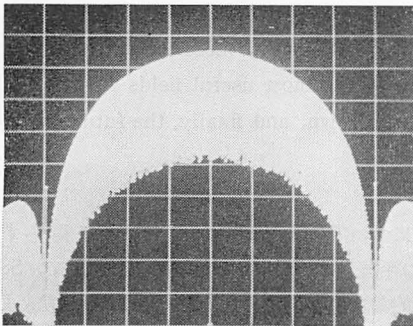
2. スペクトル拡散方式の特徴

SS 方式とは、情報の帯域幅よりはるかに広い帯域幅に信号のエネルギーを拡散して送信する方式である。この方式は、現在では、特に宇宙通信によく使われている。スペースシャトルからのデータ通信⁽¹³⁸⁾や惑星探査機の距離測定⁽¹³⁹⁾などがその例である。これは、SS 方式が他の通信に影響を与えにくいことや、送受信機間の距離を測る能力が非常に優れていることによる。さらに、最近は、より身近な通信、例えば陸上移動通信、コードレス電話、リモートコントロール装置、LAN、CATV を用いたデータ通信等、有線無線を問わない広

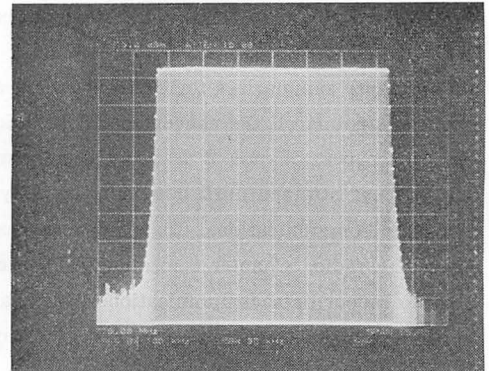
範囲の用途に対して研究と実用化が進められている。

SS 方式の送信時には、従来の通信方式と同様の「変調」を行った後、更に雑音状の拡散符号を用いた「拡散変調」を行う。これによって、信号の帯域を数百から数千倍に広げる。受信側では、送信側と同じ拡散符号を用いて、「拡散復調」(拡散された信号を元に戻す操作)を行った後、情報の復調を行う。伝搬中に加わる干渉や雑音は拡散符号と相関がないため、拡散復調のとき排除される。これによる拡散復調前後の SN 比の改善を処理利得という。これは、一般に拡散帯域幅と情報帯域幅の比で決まり、通常 1000 (30 dB) 前後の値が用いられる。

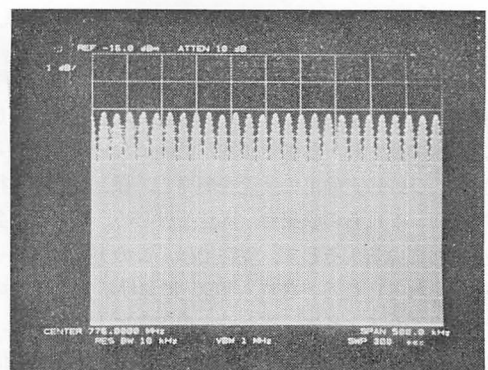
SS 方式は拡散の方法により、更に数種類に分類できる。その代表例として直接拡散 (Direct-Sequence : DS) 方式と周波数ホッピング (Frequency-Hopping : FH) 方式を挙げることができる。DS 方式は、高速 (例えば数 Mbits/s) の拡散符号で位相変調を行い、信号のスペクトルを拡散する。FH 方式の場合は、周波数シンセサイザを用いて、信号の中心周波数を一定の順序で切り替える。こうして、広い帯域内で周波数をホッピング (跳



(a) DS信号



(b) FH信号



(c) (b)の拡大図

第1図 SS 信号のスペクトル

躍) させることにより信号を拡散する。第1図に DS と FH 方式の送信スペクトルの例を示す。DS は、第1図(a)のように $(\sin(f)/f)^2$ の形になるのに対し、FH は第1図(b)のように矩形のスペクトルになる。しかし、第1図(c)のように、一部を拡大すると、それぞれの周波数を識別でき、それぞれは、DS と同じ $(\sin(f)/f)^2$ の形のスペクトルになる。

SS 方式の特長として次のような点が知られている。

(1) 他の通信システムに与える影響が小さい。

これは、拡散により送信信号の電力密度を非常に小さくできるからである。例えば、スペースシャトルと地上基地との通信には、静止軌道にある中継用の衛星 TDRS (Tracking and Data Relay Satellite) が用いられているが、TDRS からスペースシャトルへ送った電波が地上の通信網に干渉を与える恐れがあり、これを避けるために、SS 方式が用いられる。

(2) 他の通信システムから受ける影響が小さい。

これは、受信時の強力な妨害排除能力による。例えば、電力線を用いたデータ通信^{(140), (141)} 等でも同様の利点が生かせる。

(3) マルチパスに強い。

衛星—航空機間や、陸上移動通信で特に威力を発揮する。詳しくは、4.1 で説明する。

(4) 強力な秘話性がある。

拡散符号を知らなければ、復調できない。さらに、非常に低電力で送信すれば、信号を出していることも検出されない(信号秘匿)。秘話性は、SS 方式の発展に重要な役割を果たした⁽¹⁶⁾。

(5) 信号処理方法の自由度が大きい。

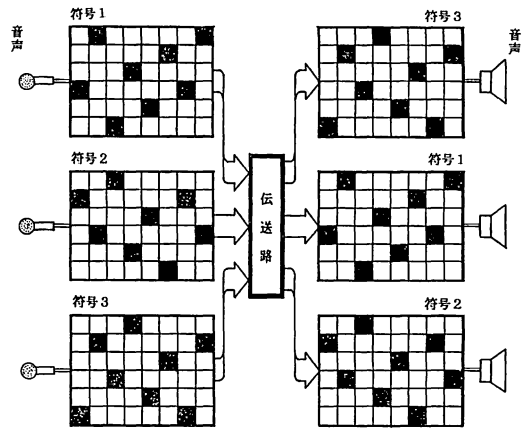
SS 方式は、情報の変調と拡散変調という2回の変調を行う。その組み合わせの中で、自由に、効率の良い符号化や変調方式を用いることができ、用途に合わせて多様な設計が可能となる。

(6) 距離測定能力が高い。

DS 方式は、高速の拡散符号を用いるので、時間の分解能が高く、高精度での距離測定ができる。ボイジャーなどの惑星探査機や、GPS (Global Positioning System) といわれる衛星による高精度の位置測定システム⁽¹⁴²⁾ として実用化されている。また、高い時間分解能により、高精度の時刻比較もできる⁽¹⁴³⁾。

(7) 非同期の符号分割多元接続 (CDMA) ができる。

多くの人々が、共通のチャンネルで、それぞれ個別の相手と通信を行うことを多元接続という。第2図に FH 方式の場合の使用例を示す。それぞれの使用者は、別々の符号 (FH 方式の場合、ホッピングパターンという) を用いて同時に通話できる。CDMA については、4., 5. で



第2図 FH 方式の多元接続

詳しく述べる。

SS 方式では、使用する符号の選択が重要である。拡散符号に望ましい条件は、

- (1) 自己相関特性が鋭いピークを持つ。
- (2) 相互相関特性が一樣に小さい。
- (3) 符号の種類が多く取れる。

等である。(1)は妨害排除能力や初期接続時の性能に、(2)は多元接続時の性能に、(3)は、割当て可能なチャンネル数に対してそれぞれ重要である。拡散符号の研究は、かなり進んでいて、DS 方式の Gold 符号、FH 方式の Reed-Solomon 符号がよく知られている。拡散符号の詳細は、文献^{(25), (26)}を参照されたい。

3. スペクトル拡散方式の発展

3.1 スペクトル拡散方式の歴史

SS 方式の歴史は複雑である。これらは、文献^{(12)~(16)}に詳しい。ここでは、ごく簡単に紹介する。

いろいろな時代と場所で、多くの人々が検出と妨害の問題に取り組んできた。Marconi 自身も干渉を最小にするため、周波数選択受信を実験している。

1929年代から1930年代にかけて、ポーランド、スイス、ドイツなどで SS 方式の発明が記録されている。

米国では、1941年に、当時の映画スター Hedy Lamarr と作曲家 George Antheil が、妨害に強い魚雷誘導システムを発明した。これは、自動ピアノに用いるような穴のあいたロール紙で送信周波数を制御するものである。

SS 方式の基本的な考えは、1950年代に出来上がった。1950年代初めに、MIT の Lincoln Lab. では、Robert Fano や Wilbur Davenport の下で、SS 方式の基礎研究が始まっていた。また、Spread Spectrum という用語は、1950年代に Sylvania Electric Products の二人の技術者によって採用された。

この方式は、従来の通信システムにない特長を幾つか有している。しかし、最近まで、その用途は、軍用等の耐干渉性、秘話性等を重視する特殊なものに限られていた。軍用としての研究成果の一部は、1985、1986年の2度にわたる IEEE Journal on Selected Areas of Communications, Military Communication 特集号^{(10),(11)}に見ることができる。SS方式に関する論文は、18件中12件、及び10件中2件である。しかし、理論解析が多く、装置や技術水準の詳細は、明らかにされていない。

SS方式の特長は、現在、軍用以外では、スペースシャトルと地上管制との通信や、航行のためのGPSシステム、レーダ天文学、Sideways-looking radarなどに生かされている。

3.2 陸上移動SS通信の研究、開発

さきに述べた軍用通信の応用の一例として移動無線用の装置が研究されていた。その代表例は、1960年代のRADA (Random Access Discrete Address) 方式⁽³³⁾である。しかし、この研究は、1970年代になって中断されてしまった。その後1970年代後半になって、SS方式のより広い分野への応用が検討され始め、特に、陸上移動通信への応用に関する研究が、再び活発になってきた。ここで、主な研究発表等を年代順に示す。

- 1976 R. C. Dixon, SS方式の解説書⁽¹⁾, 論文集⁽⁴⁾.
1976. 12 G. R. Cooper and R. W. Nettleton, 周波数利用効率のよいFH-DPSK方式の提案⁽⁴⁶⁾.
1977. 8 IEEE Trans. COM-25, SS通信方式の特集号⁽⁵⁾.
- 1978 CCIR 京都総会でのSS方式の研究の提案⁽³⁴⁾.
1980. 9 D. J. Goodman, P. S. Henry, and V. K. Prabhu, FH-MFSK方式の提案⁽⁴⁹⁾.
1981. 2 IEEE Trans. VT-30, SS移動通信方式の特集号⁽⁶⁾.
1981. 3 昭和55年度電波技術審議会答申第5編第3章「スペクトラム拡散方式を用いた電波の利用開発に関する技術的諸問題」⁽³⁶⁾.
1981. 4 昭和56年度電子通信学会総合全国大会シンポジウム「拡散スペクトル通信方式に関する諸問題」⁽⁷⁾.
1981. 6 電波研究所で、室内実験用のSSDS装置⁽⁵⁷⁾, SSFH装置⁽⁵⁸⁾, 広帯域フェージングシミュレータ⁽¹⁰⁹⁾を開発。
1982. 5 IEEE Trans, COM-30, SS通信方式の特集号⁽⁶⁾.
- 1983 C. E. Cook, F. W. Ellersick, L. B. Milstein, D. C. Schilling (ed.), SS通信の論文集⁽⁹⁾ (⁽⁴⁾の続編).
1983. 7 電波研究所で、FH方式の車載用の装置(SSFH2)を開発。
1984. 1 SSFH2装置の無線局(6局)と、DS方式の伝搬特性測定装置の無線局(1局)を開発。
1984. 5 FCC Docket 81-413, SS方式認可のための規則の提案⁽³⁷⁾.
1985. 6 FCC SS方式の使用認可^{(38)~(40)}.

1976年から77年にかけて出版された^{(1),(4),(5)}により、SS方式が一般に知られるようになった。これと時を同じくして米国Purdue大学のCooperらにより、陸上移動通信の周波数利用効率を従来のFM方式より増大できるというSS通信システム⁽⁴⁸⁾が提案され、周波数有効利用の面からもSS方式が目されるようになった。その背景には、陸上移動通信の需要の増大とその利用形態の多様化が進み、それらを満たす新しい通信方式が求められていたこと、半導体素子の発達により小型で低価格のSS装置の製作が可能になったこと等があった。これらの成果を踏まえて1978年のCCIR京都総会で、SS方式の有効性を見直す提案(CCIR Study Programme 18B/1)⁽³⁴⁾が採択された。その後、主に、Study Group 1 (スペクトル有効利用、監視に関する研究委員会)で関連Report⁽³⁵⁾の改訂が行われている。

1979年には、Cooperらの解析⁽⁴⁸⁾に対して、Henry⁽⁶¹⁾をはじめ幾つかの批判が出された。さらに1980年には、Bell Labs.のGoodmanらが、より優れた方式として、FH-MFSKの提案⁽⁴⁹⁾を行うなど、その後、二、三年の間に、米国を中心にSS方式の陸上移動通信への適用性についての議論と新しい提案が相次いだ。さらに、1981年2月にはIEEE Vehicular Technology Society⁽⁶⁾、1982年5月にはIEEE Communications Society⁽⁸⁾のSS方式の特集号が発行され、これまでの数年間の主に理論的な検討結果がまとめられた。また、そのころには、研究が体系化されてきた。文献^{(42)~(44)}にその総合的な解説が見られる。

国内では、1981(昭和56)年3月に2年間の審議を経て、SS方式を用いた電波の利用開発についての電波技術審議会答申⁽³⁶⁾が行われ、同年4月には、電子通信学会総合全国大会でSS方式に関するシンポジウム⁽⁷⁾が開催されて、SS方式の認識が高まってきた。

電波研究所では、それ以前から、FH方式の前身ともいえるRADAや、衛星通信への利用を目的としたSSRA⁽¹⁴⁴⁾の研究を行ってきたが、1978年から、電波監理局(現在の電気通信局)からの研究依頼事項として、

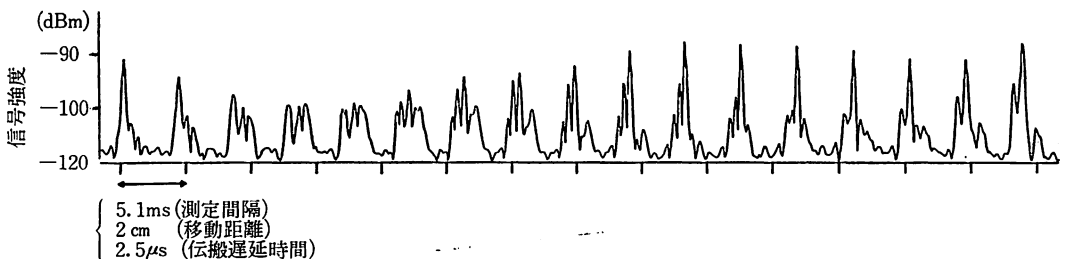
陸上移動通信への適用性の検討を開始し、その翌年からは、室内実験用の装置（エンジニアリングモデル）の開発を開始した。エンジニアリングモデルは DS 方式による SSDS (Spread Spectrum Direct Sequence) 装置、FH 方式による SSFH (Spread Spectrum Frequency Hopping) 装置、及び室内で都市内の伝搬状態が発生できる広帯域フェージングシミュレータから構成される。そして、1981年から、これらの装置を用いた各種実験を行ってきた^{(56)~(60), (74), (75), (78)}。さらに、1983年に、室内実験の成果を基に、多元接続時を含む野外実験を目的として、FH 方式の車載用のシステムモデル (SSFH2) を開発した^{(61), (64)}。本装置では、周波数ホッピングによるスペクトル拡散に加え、高度な信号処理技術を用いて、大幅な性能向上を図った。そして、1984年からこの装置を用いて野外実験を行なっている。その結果、この装置のマルチパスフェージングに対する改善が極めて大きいことが確認された⁽⁷⁷⁾。また、多元接続時にも従来理論的に予測されたような性能を得られることが明らかになってきた⁽⁶²⁾。

1981年以降、FCC (米国連邦通信委員会) は、SS 方式の一般への認可に関して各方面の意見を求め、1984年にこれらを集約した⁽³⁷⁾。FCC は、干渉を受けにくいことや、秘話性、選択呼び出し等を特長として挙げている。これによって CDMA (Code-division multiple access) システム、コードレス電話、ワイヤレスマイク等への利用を考えている。そして1985年6月には、SS 方式の民間利用の第一歩として、ISM バンドと警察無線への SS 方式の使用を認可した^{(38)~(40)}。これにより、SS 方式は、一般に開放され、新たな実用段階に入った。この詳細は、8. で述べる。

4. 陸上移動通信への応用

4.1 陸上移動通信の特徴

4.1.1 マルチパスフェージング



第3図 DS 信号を用いた市街地の伝搬遅延特性の測定例。

陸上移動通信では、電波の見通し内で通信することはまれで、一般に建物等で反射、回折して様々な経路を経た電波が重なって受信される。これは、多重路（マルチパス）伝搬と呼ばれ、さらに走行によって受信状態が大きく変動し、フェージングが発生する。特に SS 方式のような広帯域の通信方式では、マルチパスの伝搬遅延時間の広がりによる選択性フェージング（伝搬路の周波数特性が帯域内で平坦でないフェージング）の考慮が必要である。陸上移動通信での高速デジタル伝送のための多重波伝搬の研究は、各国で行われている^{(95)~(107)}。

多重路伝搬特性の測定には、DS 方式が極めて有効である。第3図に当所で DS 信号を用いて測定した市街地の伝搬遅延の測定例を示す⁽¹⁰⁷⁾。道路上を約 2 cm 移動するごとに、最大遅延時間 2.5 μs までの多重波を測定している。いろいろな遅延時間の波が重なっていると同時に、わずかな移動によって遅延特性が大きく変化し、非常に複雑な伝搬特性を示している。このような測定は、DS の初期捕捉時のスライディング相関*を連続して行ったときの出力と考えられる。

DS 信号による伝搬遅延特性の測定器は、DS 通信装置と次の点が異なる。

- (1) 送受信機間で同期をとらず、独立した高安定のクロックを用いる。
- (2) 拡散変調のみで情報を載せない。
- (3) 受信信号の同相及び直交成分の検波出力を用いる。

DS 方式は、このようにマルチパスを時間的に分離でき、それぞれのパスを通った信号を別々に拡散復調して再合成することにより性能改善ができる。この方式を、パスダイバーシティと呼ぶ⁽²³⁾。FH 方式は、選択性フェージング下では、すべての周波数が同時に落ち込むことがないのを利用し、誤り訂正符号の併用による周波数ダイバーシティ効果が期待できる^{(145), (69)~(71), (73)}。また、選択性フェージング下でホッピングさせると、周波数軸上でバースト誤りをランダム化できる。これは、時間軸上

* スライディング相関とは、受信側の PN 符号の位相をシフトさせ、相関出力のピークを探す方式である。

でのビットインタリーブに対応した効果である⁽⁷²⁾。

このような DS と FH 方式のフェージングに対する特徴を文献⁽⁶⁹⁾に基づき、簡単に第1表に示す。両方式のダイバーシチ効果による性能改善は、電波研究所での実験でも確認された^{(56)~(58), (74), (77)}。

第1表 DSとFH方式のフェージングに対する特徴

	DS	FH
多重路伝搬に対する利点	高い時間分解能による多重波の分離	周波数選択性フェージング下で広範囲にホッピング
ダイバーシチ	多重通路(パス)ダイバーシチ(パスごとの信号を別々に拡散復調して再合成)	周波数ダイバーシチ(コヒーレント帯域幅より広い範囲でホッピングさせFECを併用)
特 色	時間領域 コヒーレント合成	周波数領域 誤りのランダム化 非コヒーレント合成

また、陸上移動通信用の SS 方式の研究と平行して、伝搬遅延を含む多重伝搬特性を室内で再現できるフェージングシミュレータも幾つか開発されている^{(108)~(110)}。

4.1.2 遠近問題

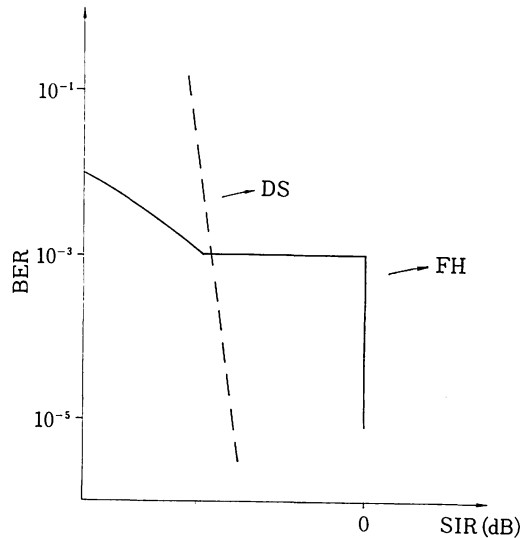
移動体から基地局、あるいは移動体間の通信で、希望局が遠方にあり、妨害局が近傍にあるとき、妨害局の信号が強力で、希望波が受信不能になるときがある。このような状況を遠近問題 (Near-Far Problem) という⁽¹⁾。これは従来の狭帯域移動通信でも同一チャネル混信妨害や、隣接チャネル妨害として問題になっている。SS 方式の場合、常に周波数帯を共用するため、場合によっては大きい妨害になる。

この遠近問題に対しては、リミッタと誤り訂正符号を用いた FH 方式が有利と考えられている。FH 方式では、干渉は別の送信機が同じ周波数にホップしてきたときに生じ、“ヒット”として知られている。ホッピング系列は、ヒットを最小限にするように設計される。ヒットによって生じる干渉の程度は、希望波と干渉波の信号レベルの差には、大きく影響されない。したがって、FH にとって、遠近問題はそれほど深刻ではない。

第2表に、DS と FH がそれぞれの干渉に対して、どのように振る舞うかの比較を示す。DS の排除能力は、熱雑音、他の DS 信号、狭帯域干渉波に対して、処理利得によって決まる。FH は、干渉により大きく異なり、特に CW 干渉波に対しては、ヒットの確率と、逆拡散後の帯域通過フィルタの特性によって決まる。文献⁽⁵⁹⁾を参考にこの影響を第4図に模擬的に示す。実線は、FH 方式の場合で、1チップ/データビット伝送時(一つの周波数でデータ1ビットを伝送し、誤り訂正符号を用いない場合)を考える。横軸は、SIR (Signal to Inter-

第2表 DSとFH方式の各種干渉波に対する特徴

	DS	FH
白色ガウス雑音	処理利得による排除	処理利得による排除
狭帯域干渉波	処理利得による排除	ヒットの確率と帯域通過フィルタの性能による。
多局干渉	拡散符号間の相互相関特性による。	ヒットの確率と帯域通過フィルタの性能による。



第4図 DS と FH 方式の CW 干渉波による誤り率特性。

ference Ratio) である。SIR が 0 dB 以上なら、どの周波数も誤らないが、それ以下なら、干渉を受けた一つの周波数スロットのみに誤りが生じ、その誤り率は、使用する波の数の逆数になる。更に干渉電力が増加し、ある値以下の SIR になれば、隣接周波数への干渉波の影響などにより誤りが増加する。この領域での性能は、方式ではなく、ハードウェアに依存する。破線は DS の場合である。SIR が小さい、すなわち遠近問題発生時には、FH の方が有利になる。他局の周波数ホッピング信号が干渉波の場合も CW 干渉波の場合と同様の性質を示す。

SS 方式に対する干渉は、ジャミング (意図的な妨害) の観点から扱われることが多い。FH 方式についてのまとめは、文献⁽⁹⁴⁾にみられる。

4.2 移動 SS 通信の分類

無線通信の多重化の方法として、現在主に二つの方法が用いられている。一方は、周波数分割多元接続 (Frequency-Division Multiple Access: FDMA)、もう一方は、時分割多元接続 (Time-Division Multiple Access: TDMA) である。周波数分割では、通信に使

移動通信用多元接続方式

多元接続方式	拡散変調方式	情報変調方式	符号復号化方式	理論上のモデル	装置名	他の応用例
FDMA (SCPC)	-----	FM FSK MSK等	()内は関連技術との対応 多数	陸上移動通信での使用例多数		
TDMA	-----			開発途上		
同期 CDMA	同期 SSMA	MFSK (FH) BPSK (DS)	Hadagard マッチドフィルタ (a,d) Reed-Solomon ハード判定 (a,c,d)	Yue 多数 Goodaan		有線、光 LAN SS 放送
非同期 CDMA	PAMA (RADA) 非同期 SSMA	MFSK (FH) BPSK (DS)	Hadagard 最尤判定 (a,d) Repetition ハード判定 (d) Reed-Solomon ソフト判定 (a,b,c,d) サウンダ付 RAKE (e,f) Post-Detection-Integration (e,f)	Cooper 多数 多数 Turin	SSFH1 (RRL) SSFH2 (RRL) TATS SSDS (RRL) HP Radio Data Link, 他多数	室内用無線 データリンク
パケット通信 (CSMA)		BMSK (DS)	Post-Detection-Integration (e,f)		ARPA PRNET	移動 LAN 専用パケット
単一チャンネル		MFSK (FH) BPSK (DS)	各種 S/Nの改善 耐干渉性を重視	多数	多数	深宇宙通信 軍、警察

* 拡散変調は行うが CDMA は行わない。

関連した技術	
FH	(a) 符号化技術 (b) フェージング下の最適受信機 (非コヒーレント) (66) (c) 多値化による広帯域伝送 (d) 断続波ダイバーシチ効果
DS	(e) フェージング下の最適受信機 (コヒーレント) (Ra ke 方式) (76) (f) パスタイバーシチ効果

第 5 図 移動通信用多重化方式の系統図

われる周波数帯を細かく区切り、それぞれを利用者に割り当てる。この方法は、放送や無線通信で最も広く用いられている。もう一方の時分割の場合、周波数は各利用者が共用し、使用時間帯を別々に割り当てる。この方法は、デジタル通信技術と共に発達し、マイクロ波回線や衛星通信等に用いられている。

これに対し、SS 方式は拡散符号によって相手を区別できる。これは、送信された信号自身が識別符号を含んでいると考えることもできる。SS 方式による多元接続を符号分割多元接続(Code-Division Multiple Access : CDMA) と呼ぶ。

陸上移動通信で実用化されている多重化方式の大部分は、装置の小型化、経済性などから、FDMA の一種ともいえる SCPC (Single Channel per Carrier) 方式である。この方式のために、様々な変復調や符号化の方法が検討されていた^{(111)~(117)}。しかし、今後は、様々な多重化方式が利用されるようになる。SS 方式を中心に、移動通信で考えられている多重化方式を系統的にまとめて、第 5 図に示す。さきに述べた FDMA, TDMA, CDMA が主な多重化方式である。他に、コンピュータ通信に用いられるパケット通信も、移動通信への応用が検討されている。

一般に CDMA は TDMA と異なり、各利用者は、全く任意のタイミング (非同期) で自由に相手を選んで

通信できる。これをランダムアクセスと呼んでいる。また、現在では、各利用者がタイミングを合わせる符号分割多重も多く考えられている。第 5 図では、前者を非同期 CDMA、後者を同期 CDMA と呼んで区別する。かつては、非同期 CDMA を SSMA と PAMA (RADA) に分類する考え方もあった。RADA は符号分割による多元接続が可能であるが、DS と同じような意味で、スペクトル拡散を行っているとは考えにくい。その意味で RADA による多重化は、SSMA と異なる考え方に基づいている。しかし、RADA は FH の初期段階と考えられ、現在では使われることはほとんどなく、方式としても、FH 方式に吸収されている。したがって、以後は、CDMA と SSMA を同じ意味として扱う。

CDMA は、拡散変調の方式により更に数種類に分類できる。拡散変調のとき、2 値の PN 符号を用いて PSK 変調を行った場合が DS で、多値の FSK 変調を行えば、FH ということになる。他に、CHIRP や TIME HOPPING (TH) などが挙げられる。TH を FH と併用することによって、利用効率をさらに改善できるという報告⁽⁵⁴⁾もある。これらの方式の詳細は、文献(1)などを参照されたい。同期 CDMA と非同期 CDMA の比較は、5. で述べる。

DS, FH 方式とも、情報 (一次) 変調及び符号化方式との組み合わせが幾つか提案されている。これらの技術

は、SS方式とは独立した一般的な信号理論、符号理論等に基づいている。SS方式と併用することにより、広帯域通信の利点も生かして大幅に性能を改善できる。図の中では、主な改善方式とその応用例が対応づけられている。

第5図では、FHはCDMAの一方式に分類されているが、情報速度よりホッピング速度の方が遅い Slow-Hopping といわれる方式は、デマンドアサイン SCPC（一話ごとに周波数を割り当てる）に近い側面がある。FHの場合、一定周期で周波数を切り替えるが、SCPCは一話話単位となる。また、同期FH/CDMA方式は、CDMAの考え方のほかに、時間と周波数の直交性を同時に利用しているという意味で、TDMAとFDMAの混合という解釈もできる。

現在、CDMAはすべてSS方式を用いているといっているが、逆に、SS方式がすべてCDMAで多重化して通信を行っているわけではない。例えば、深宇宙通信のように、SN比の改善を重視するシステムや、軍や警察用の耐干渉性を重視するシステムは、広帯域を単一チャネルで占有する。

また、パケット移動通信にもSS方式が用いられるが、CDMAでの多重化を主目的にしていない。また、パケット通信は、伝送遅延を前提とし、データをバースト的に送信するという点で、TDMA、FDMA、CDMAの電話におけるリアルタイムでの通信とは、使用法が異なる。パケットSS通信については、7.で説明する。

4.3 装置の代表例

4.3.1 FH装置

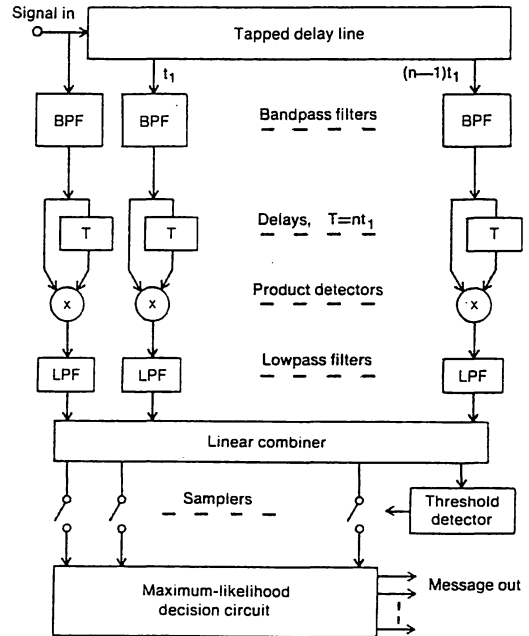
初めに周波数有効利用を特長として提案された方式は、FH-DPSK (FH-Differential-Phase-Shift-Keying) であった⁽⁴⁸⁾。このシステムは、非同期CDMAによる多重化を行い、次のような形態を有する。

- (1) 小ゾーン（セルラー）方式で、通話は、基地局を経由して行う。
- (2) 移動局→基地局への通信には、送信電力制御を行う。
- (3) 一例として、上り、下り回線それぞれ20MHzの帯域と、1チャンネル当たり32周波数スロットを用いる。

第6図に受信機のブロック図を示す。タップ付遅延線と帯域通過フィルタによって、ホッピングパターン1フレーム分の波形を蓄積する。さらに、遅延線、乗算器、低域通過フィルタにより、1フレーム前の波形との間で遅延検波を行う。最後にリアコンパイナと最尤判定回路によって送信ディジットを復調する。

このシステムの利点はCooperらによると、

- (1) フェージングに対する周波数ダイバーシチ効果。
- (2) ランダムアクセスにより、いつでも通話が可能。



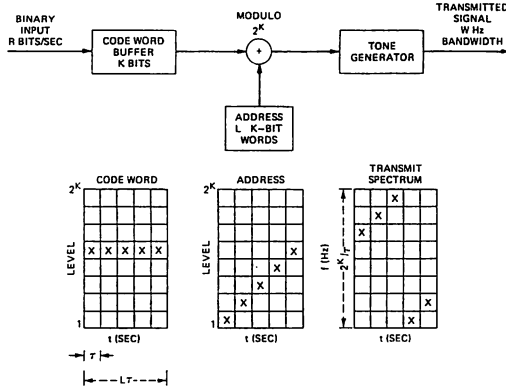
第6図 FH-DPSK 受信機のブロック図

- (3) 通話者の増加に対して、品質が急激には、劣化しない。
- (4) 秘話性。
- (5) ゾーンの移動によるチャネル切替えが不要。
- (6) 送信出力を大きくするなどの方法で、優先度の高い通信はチャネルが飽和しても可能。
- (7) 従来のFM方式に比べ、ゾーン及び帯域当たりの同時通話者数の増大が期待できる。

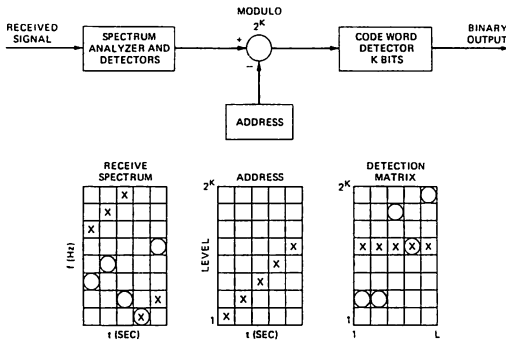
このうち、(7)については、5.3で詳しく述べる。例えば、ダイバーシチを行えば、FMシステムの方が効率がよくなるといった反論⁽⁸⁰⁾や、デジタル伝送において、MSKと比較した例⁽⁸²⁾もある。

その後、Bell研究所から、Cooperのモデルを上回る通話者が得られるシステムが提案されている。このうち一方は、Cooperと同じFH-DPSK又はFH-PSKのシステム⁽⁸¹⁾、他方は、FH-MFSK (FH-Multilevel FSK)⁽⁴⁹⁾のシステムである。第7図にFH-MFSKシステムの送信及び受信時の信号処理方法を示す。

これらのシステムでは、同期CDMAで多重化することによって、性能の改善を図っている。第8図にFH-DPSKとFDMAの E_b/N_0 （ビットあたりの信号エネルギー対雑音密度比）に対するビット誤り率を示す。例えばFH-DPSKのシステムで、100の周波数チャンネルを100の通話者が同時に使用したとき、FDMAに比べ25dBだけ E_b/N_0 が低くても、同じ 10^{-3} の誤り率が得られる。これは、4.1.1.で述べた周波数ダイバーシチ効

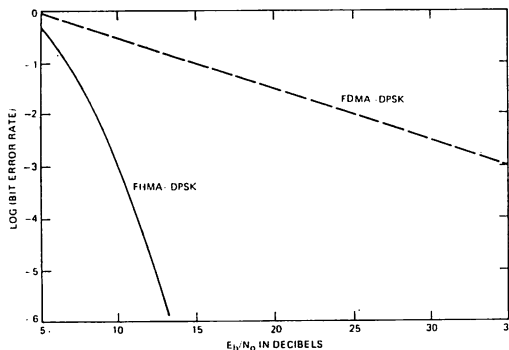


Transmitter. The block diagram indicates signal processing operations. The matrices show sequences of logic levels (code word, address) or frequencies (transmitted spectrum) within the transmitter. Each user has a different address sequence consisting of L K -bit words.



Receiver block diagram and signal matrices. The matrices show reception of the frequencies in Fig. 1 (X) and reception of a set of tones (O) transmitted by one other user.

第7図 FH-MFSK システムの信号処理

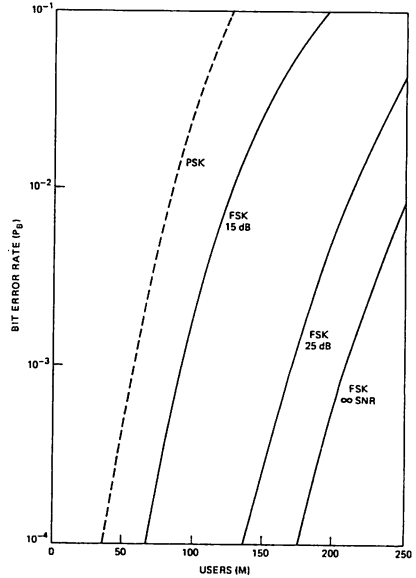


—Comparison between frame-synchronous FHMA and FDMA using differentially coherent PSK and Hadamard coding with rate 5/32 for 100 users sharing 100 frequency channels.

第8図 同期式 FH-DPSK システムの性能

果による。また、第9図に、FH-MFSK と FH-DPSK システムの同時通話者数の比較を示す⁽⁴⁹⁾。この結果によれば、FH-MFSK システムは、白色ガウス雑音があっても、FH-DPSK システムより、多くの通話者を収容できる。

その後、複数の周波数を同時送信することを許すこと



Comparison of FSK and PSK spread-spectrum performance in selective Rayleigh fading. Although the PSK curve pertains to infinite s/n ratio, that system is quite immune to noise and the curve would be changed little by inclusion of receiver noise unless the average s/n ratio were below about 9 dB.

第9図 FH-MFSK システムの同時通話者数

によって、チャンネル利用率を改善するシステム⁽⁵²⁾や、FH-SSB のシステム⁽⁵³⁾も提案されている。これらは、ハードウェアの構成が複雑になる。現在のところ先上げた FH-MFSK と FH-DPSK が主な方式と考えられている。

また、FH 方式は、干渉の種類によって、その最適な情報復調方式が異なる。この最適化については、Yue の一連の論文^{(83)~(85)}がある。

第3表に特徴的なシステムの提案例をまとめる。それぞれの方式が有効性を主張しているが、実際に装置化には至っていない。また、最近の主な性能解析は、実用システムよりも大学の学術的なものが多い^{(86), (90)~(93)}。これらのシステムの優劣は、コストや信頼性なども含めて、総合的に判断しなければならない。また、これらの提案は、移动通信の運用に必要なすべての条件を考慮したものではなく、実用化のためには、更に実験と解析が必要であろう。

FH 方式のハードウェアは DS 方式に比べ報告例が少ない。基本的な FH-BFSK と FH-MFSK については、電波研究所でも装置化している。もともと FH-MFSK 方式は、衛星通信で効果があると考えられていた。情報変調を多周波化することにより、性能を改善できる。しかし、多周波化を進めると、復調時に非常に多くの周波数を検出する必要があり、ハードウェアが複雑になる。SAW マッチドフィルタや、DSP を用いた FFT 演算処理などが有効であり、これらは近いうちに実用レベル

第3表 陸上移動通信用FH方式の研究例

文献	著者	雑誌名	年次	情報整調方式	主な特徴	移動通信での利点	CDMA	その他
47	Cooper	IEEE Trans. VT	1977	DPSK	周波数の有効利用を主張	周波数ダイバーシティ効果	非同期	電力制御
82	Yue	B.S.T.J.	1979	DPSK	同期式MSFKの提案	同期CDMAによる性能改善	非同期	
48	Goodman	B.S.T.J.	1980	MFSK	FH-MFSK, 多数決判定	FH-DPSKを上回る性能	非同期	
49	Timor	B.S.T.J.	1980	MFSK	他局の干渉パターン検出	Goodmanより50%の通話者増大	同期	装置は複雑
50	Timor	B.S.T.J.	1982	MFSK	マルチトーン送信	Goodmanより10%の通話者増大	同期	装置は複雑
51	Prabhu	B.S.T.J.	1982	SSB	FH-SSBの提案	FH方式より20%の通話者増大	同期	装置は複雑
52	細川	信学技報CS	1982	MFSK	Time Hoppingの併用	Goodmanより20%の通話者増大	同期	
89	Yan	IEEE Trans. COM	1984	MFSK	Chernoff boundの計算	解析手法の一般化	同期	
88	Einarsson	B.S.T.J.	1984	MFSK	Convolution Code	Goodmanより70%の通話者増大	同期	
93	Viswanathan	IEEE Trans. COM	1985	MFSK	Non Parametric Receiver		非同期	
92	Niyonizeye	IEEE Trans. VT	1985	BFSK	FH-BFSKの有効性	条件により最大25%の通話者増大	非同期	
94	Lam	IEEE Trans. COM	1986	DPSK	Near Optimum, 一般化	解析手法の一般化	非同期	

に達するであろう。

4.3.2 DS 装置

DS方式は、4.1.1の陸上移動伝搬特性の測定に多くの実績を有するが、移動通信への適用性については、FHよりも研究例が少なく、積極的にCDMAでの移動通信への適用性を主張している論文も少ない。この大きな理由は、遠近問題を回避するのが困難なためである⁽⁴⁴⁾。RAKE方式^{*(76)}を基にしたTurinのモデル⁽⁸⁹⁾が有名である。また、電波研究所でも室内実験⁽⁵⁷⁾と理論検討⁽⁷⁵⁾を行った。拡散符号速度1.5MbpsのDS方式の走行実験結果も報告されている⁽⁵⁵⁾。

DS方式は、むしろパケット移動通信や構内移動通信用としての研究が盛んである。これらについては、6., 7.で詳しく述べる。

4.3.3 同期系

SS方式の性能はほとんどの場合、初期捕捉、同期保持が完全に行われているという前提で、議論されている。しかし実際の運用上は、遠近問題やフェージングから、同期系が致命的な影響を受けることもある。

電波研究所で、DSとFH方式それぞれについて、同期方式間のフェージングの影響の比較を行った^{(57), (58)}。DS方式では、(1)通常のスライディング相関方式、(2)合成方式(パスダイバーシティの合成出力で同期を判定)、(3)10ブランチ方式(パスダイバーシティのブランチ各々に拡散符号の位相の一部を割り当て、スライディング相関を行う方式)を比較した。その結果10ブランチ方式が常に最も早く捕捉できた。FH方式では、(1)通常のスライディング相関方式、(2)3周波数の並びを待ち受ける簡易マッチドフィルタ方式を比較した。その結果、マッチドフィルタ方式は、SN比が高いときは、捕捉が極めて早いですが、SN比が悪くなると非常に時間がかかり、平均的には、スライディング相関方式の方が信頼性が高いことが明らかになった。

また、フェージングに対する同期はずれを分析した研究もある⁽⁶⁵⁾。しかし、移動通信に適した同期技術は、変復調方式ほど確立されていない。試行的に幾つかの方式を用いているのが現状である。

また、電波研究所の野外走行実験では、初期捕捉時に、自動車雑音の影響が観測された。従来、800MHz帯は都市雑音の影響が少ないといわれていたが、捕捉時のような広帯域で待ち受ける状態では、無視できないことが明らかになった⁽⁶³⁾。

スライディング相関時の初期接続時間は、移動通信の

* パスダイバーシティを行う際、それぞれ異なるパスで到来する信号をかき集める様子から、くまで(Rake)方式といわれる。

第4表 現在の技術基準に基づく、DSとFHの移動通信への適用性の比較

	DS	FH
ダイバーシチ	パスダイバーシチ コヒーレント合成を行う。 フェージングによる高速の位相変動に追従できること、多重伝搬路の遅延特性に対応した ブランチ数、パス間隔を選択することが課題 である。	周波数ダイバーシチ 非コヒーレント合成を行う。 白色ガウス雑音に対して、コヒーレント合成 より性能が劣るが、フェージングに対して は、安定に動作する。
ハードウェア	チップ速度が非常に高速(約100MHz以上) のときはやや複雑になるが、一般に、実現が 容易である。	低速のホッピング(1 khop/s以下)の場合を 除き、高性能のシンセサイザが必要となる。
遠近問題	解決方法の提案はあるが、現在のところ有効 性が実証されていない。	リミッタと誤り訂正符号による改善。
拡散帯域幅	PN符号のチップ速度に依存。	ホッピング速度とは無関係 ホッピングパターンとシンセサイザにより帯 域が決まる。
初期捕捉	数百チップまでは、マッチドフィルタの使用 が可能。 スライディング相関方式の場合数百ミリ秒程 度。	数十周波数スロットまでは、マッチドフィル タの使用が可能。スライディング相関方式の 場合数百ミリ秒程度。ただし、ホッピング速 度が遅く、周波数スロット数が多いと同期に 非常に時間がかかる。
同期CDMA	チップが高速であること、マルチパスの遅延 があること等から非常に困難である。	数十 khops/s 程度なら実現可能。
現行の移動通信からの拡張性	かなり異質で、簡単には、拡張できない。	SCPC方式の各周波数を、スロットと考えれ ば、拡張ができる。
必要な周波数安定度	情報帯域幅で決まる。(逆拡散後のIF段で BPF通過時に、周波数のずれによる信号電力 の損失を生じさせない安定度) 10^{-6} 程度。	ホッピング速度に対応した帯域幅で決まる。 (逆拡散後のIF段でBPF通過時に、周波 数のずれによる信号電力の損失を生じさせ ない安定度) 10^{-6} 程度。
時間分解能、測距能力	高速の符号を用いれば、非常に高い。	ホッピング速度で決まり、一般に低い。
他の通信への干渉	熱雑音状。	パルス状。

場合1秒では長過ぎる。0.1秒程度が望ましい。この点、初期接続を必要としないマッチドフィルタが有効であるが、民生用として実用レベルに達したのは、ごく最近である。CCD マッチドフィルタも活用されている⁽¹³⁷⁾。これらのデバイス技術を中心とした同期系の解説がある⁽²⁴⁾。また、マッチドフィルタを用いても、データ復調時にクロック抽出が必要である。狭帯域移動通信でも、このときにマルチパスの影響が指摘されている⁽¹²⁰⁾。

同期系の研究は、変復調の研究よりも数年程度の遅れがある。移動通信の最悪の条件にも耐えられる方式の確立には、更に研究が必要である。

4.3.4 移動通信への適用性に関するDSとFHの比較

現在の技術レベルを考慮したときの、DSとFHの移動通信への適用性の評価を第4表に示す。主な特徴は、次のとおりである。

(1) フェージングに対してFHの周波数ダイバーシチは、比較的簡単な構成で大きな効果を上げることができ、DSのパスダイバーシチは、実際にハードウェアで実現するときに解決すべき問題が、幾つか残っている。

(2) FHには、高速切替えが可能な周波数シンセサイ

ザが必要である。技術的には確立され、十分小形化できるが、コストをどこまで下げられるかが課題である。

(3) FHの場合、4.1.2で述べたように、移動通信における遠近問題発生時にも、リミッタや誤り訂正の併用によりビット誤り率の軽減が可能である。これは、CW干渉時の状態と同様、遠近問題発生時にすべての周波数スロットが均等に干渉されないためである。DSの場合、復調時に干渉電力が一樣に拡散されるため、処理利得以上の改善は期待できず、このような対策は有効でない。

(4) FHの場合、拡散帯域はホップ速度に依存しない。低速のホッピングで広帯域に拡散できるため、処理利得を大きく保ったままで、同期追跡(Tracking)を容易にでき、また、多重伝搬による遅延広がりや、周波数シンセサイザの切替え時間の影響を小さくできる。

(5) FHの場合、(4)で述べた低速のホッピングにより、同期CDMAが、容易に実現できる可能性がある。

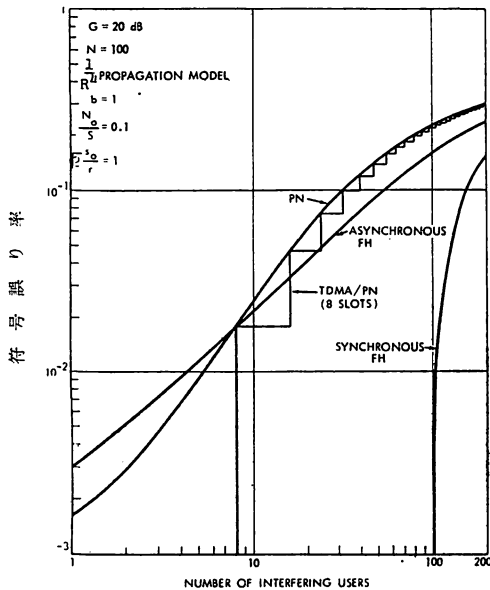
(6) FHが移動無線に受け入れやすい理由の一つは、現行のSCPCの陸上移動通信から拡張して考えることが、容易だからである。現在の自動車電話や、MCA、パーソナル無線用の無線線は、周波数シンセサイザを内蔵し、必要に応じて使用周波数を切り替えることができ

る。これらは、4.2で述べた Slow-Hopping の装置とはそれほど大きなハードウェア上の違いはない。FCCでもこのような考え方があり、警察無線に、現行のSCPC方式の割当て周波数内でのホッピングを認める方針である。これに対して、DSは、かなり異質な方式と考えられている。

(7) 通信と同時に測距（位置検出）を行うような用途には、DSが適している。

(8) 他の、通信と周波数帯を共用する場合、SS方式が与える干渉は、DSは熱雑音状、FHはパルス状になる。どちらが、強い影響を及ぼすかは、相手の方式や、伝送内容によって異なる。

多元接続の古典的解析の例として Musa の結果⁽⁷⁹⁾を第10図に示す。PN (DS)、非同期 FH、同期 FH、時分割 PN の比較である。同期 FH が最も性能がよい。DSと非同期 FH は、干渉局の位置の分布によって優劣が異なるが、傾向として干渉局が近いと FH、遠いと DS が有利になる。



Comparison of Spread-Spectrum Techniques for CPSK Interfering Signals and Background Noise

第10図 多元接続時の DS と FH 方式の性能比較

以上の比較のように、一般に陸上移動通信で、多元接続を行う場合、FH方式が適していると考えられている。

5. 符号分割多元接続 (CDMA) とスペクトル利用効率

5.1 多元接続と直交性

一般に、パケット通信では、ランダムアクセスの自由

度が大きいと、伝送効率が低い。例えば、ALOHA 方式の伝送効率（スループット）は18%である。送信のタイミングに制限を加える SLOTTED ALOHA では、効率を倍にできる。CSMA や予約 ALOHA では、更に効率を上げることができる⁽¹²⁶⁾。しかし、そのためには、タイミングや伝送手順の制御が必要となる。同様に、非同期で符号分割を行うと、完全なランダムアクセスができる反面、他局からの干渉を完全に無くすることはできず、伝送効率が低下する。これは、拡散符号の相互相関を完全には0にできないことに対応している（準直交 (quasi-orthogonal) の多重化）。これに対して、TDMA や FDMA は、直交 (orthogonal) した多重化が可能で、理想的には、チャネル間の干渉を完全に無くすることができる。

CDMA でチャネル間の符号の位相を合わせて、直交化する方式が、4.2で述べた同期 CDMA である。この場合は、理想的には、他局からの干渉を完全に無くすることができる。しかも、受信機の装置構成は、非同期の場合と基本的に同じでよく、送信のタイミングをとることを除きランダムアクセスの利点はそれほど失われない。

4.3.1 で述べたように、同期式の FH 方式を移動通信に用いると、多元接続時の性能を大幅に改善できると考えられる。DS 方式は、有線の LAN の多元接続等にも有効であろう。また、同期 CDMA は、SS 信号を放送に用いる場合⁽¹⁴⁶⁾にも使用できる。なお、DS 方式の拡散符号には、通常の PN 系列を少し修正して用いる^{(27), (28)}。

第5表に多元接続と直交性との関係をまとめて示す。組み合わせとして、同期 FDMA や非同期 TDMA も考えられる。前者は、それぞれの搬送波の位相関係をうまく調整することにより、チャネル間隔をより狭くできる。後者は、パケット通信の ALOHA 方式に近い形になり、伝送効率は、大きく低下する。

第5表 多元接続と直交性の関係

分割方法	同期	非同期
周波数	—	* FDMA
符号	* CDMA	CDMA
時間	* TDMA	ALOHA, CSMA

* 直交した多元接続

5.2 符号分割多元接続の特徴

非同期 CDMA で干渉局が存在するときの通信品質を改善する方法も幾つか考えられている。干渉となっている他局信号を調べ、拡散復調時に差し引く方法⁽¹⁴⁷⁾が、代表的である。また、FH 方式で、現在、送信されているホッピングパターンを調べ、それを避けるようなホッ

第6表 SS方式と狭帯域方式の周波数利用効率の計算例

I. Narrowband spectral efficiency

Cluster size	Advanced Mobile Phone System	Linear-predictive coding	Single-sideband
4	6.7	40	67
7	3.8	23	38
12	2.2	13	27
19	1.4	8.4	14
27	1.0	6.0	10
48	.56	3.4	5.6

II. Spread-spectrum spectral efficiency

System	Data rate			Base-station antenna
	30 kb/s	10 kb/s	2.4 kb/s	
Differential-phase shift keying Multiple-frequency shift keying Timor	1.7 5 11	5 15 33	21 63 138	Omnidirectional
DPSK MFSK Timor	5 15 33	15 45 99	63 186 412	Three 120° sectors
DPSK MFSK Timor	10 30 66	30 90 198	126 392 824	Six 60° sectors

ピングパターンを用いることにより、50%の改善が期待できるという計算例もある⁽⁵⁰⁾。

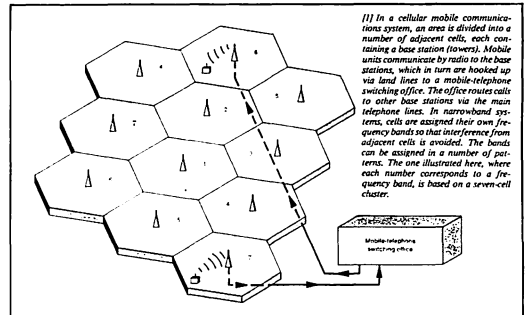
また、通信システムは、通信品質を制限する要因から次のように分類できる。

- (1) 受信機の熱雑音や周辺環境雑音による制限：深宇宙通信、衛星通信等
- (2) 意図的な干渉、妨害による制限：軍、警察通信
- (3) 同時に運用しているチャネルからの干渉による制限：陸上移動通信、携帯通信

これらの要因のうちどれか一つなら SS 方式によって制限を緩和できるが、二つ以上の制限を同時に緩和するのは難しい。例えば、雑音の多い環境で非同期 CDMA を行っても最高の性能は得られない。その点、セルラー方式の移動通信は、他局の干渉によってのみ通話者数が制限され、CDMA を用いる意味がある。特に、セルの外からの干渉が大きいときに効果が大きい。これについては、5.3 で詳しく述べる。

非同期 CDMA の同時通話者数は、許容される信号の品質にも依存する。信号の品質が悪くても許されるなら、代わりに、同時通話者数を増やせる。逆に、非常に高い信号品質（デジタル伝送なら、ビット誤り率が非常に低い状態）が必要なときは、非同期 CDMA は適さない。

5.3 スペクトル利用効率



第11図 陸上移動無線におけるセルラー方式

CDMA の移動通信の同時通話者数の検討例は多いが、セルラー（小ゾーン）方式のスペクトル利用効率* は Cooper らのシミュレーション⁽⁴⁸⁾があるのみである。第11図にセルラー方式の使用例の模式図を示す。セルラー方式の場合、ある程度離れたセルでは、同一の周波数を使用できる。しかし、隣接したセル間では、別の周波数を使用しなければならない。それぞれ異なる周波数を用いる隣接セル群をクラスターと呼んでいる。

SS 方式の場合、すべてのユーザが同じ周波数帯を共有でき、狭帯域の方式のように、干渉を避けるために、

* ここでいうスペクトル利用効率は、単位セル、単位帯域あたりの通話可能者数である。

第7表 移動通信の多重化方式の比較

	FDMA(SCPC)	TDMA	同期 CDMA	非同期 CDMA
ダイバシティ	主にアンテナに依存 空間ダイバシティ, 指向性ダイバシティ等		DSのパスダイバシティ, FHの周波数ダイバシティ等SS方式が潜在的に有する機能を用いる。アンテナ系のダイバシティも併用可能。	
フェージングに対するデータの信頼性	やや小さい	小さい, ダイバシティ, イコライザが必要	大きい	
秘密性	アナログのままでは小さい, デジタル化, スケランブルによりやや大きい。	大きい	非常に大きい	
変復調, 符号復号化方式の自由度	小さい	やや大きい	大きい	
遠近問題	小さい			やや小さい, (DS: 大きい)
チャンネルの利用効率	大きい			一般に小さい, セルラー方式にすると, 条件により大きい。
チャンネル間干渉の除去	ガードバンド	ガードタイム	ガードバンド, ガードタイム	干渉は完全には, 除去できない, 送信電力制御が必要。
ゾーン内の移動による伝搬時間の変化の, 多重アクセスへの影響	小さい	大きい	小さい (DS: 大きい)	
基地局のハードウェア	MCAの制御 やや簡単	複雑	やや複雑	中継のみなら簡単 逆拡散して中継すると複雑
移動局のハードウェア	簡単	複雑	複雑	やや複雑 (電力制御を行うと複雑)
システム全体のコスト	小さい	大きい	大きい	やや大きい
技術の成熟度 (移動通信一般) (無線通信一般)	大きい 大きい	無い やや大きい	無い 小さい	小さい やや小さい

表中, 枠が拡大されているところは, その評価が, 各多元接続方式の共通の要因で決定されることを示す。

スペクトルを分割してそれぞれを別のセルに割り当てる必要は基本的にない。Cooper らが提案したセルラー移動無線では, すべてのセルと移動局が, 利用できる帯域全体を用いて通信する。そして, 受信機は干渉に埋もれた希望信号を識別して復調する。セルはやはり, 基地, 移動局間の距離を小さくするために必要である。これにより, 移動局の送信電力を小さくできる。

全二重方式ではスペクトルの分割は必要で, 上りと下り回線を共用することはできない。また, セルラー方式では, 他の機能, 例えば, 発呼, 着呼時の交換制御や, ゾーン間移動に伴う通話中チャンネル切替え(ハンドオフ)も必要である。

第6表に, SS方式と狭帯域方式の周波数利用効率の計算例を示す⁽⁴²⁾。数字は, 1 MHz, 1セルあたりの通話可能者数である。表中 Timor とあるのは, Timor の文献⁽⁵¹⁾ のモデルによる結果を示す。SS方式の周波数利用効率は, 干渉により制限される。Cooper らの計算機シミュレーションによれば, 干渉のうち約半分は, 同じ

セルの移動局からで, 他の半分は, 他のセルの移動局全部からである。SSシステムのセルあたりの効率は, 同じシステムが孤立したセル内で運用されている場合の半分である。

例えば, FH-DPSK を 10 kbps のデータ速度で用いると, 第6表から 1 MHz あたり 5 ユーザの効率となり, 20 MHz の帯域を用いた場合, セルあたり 100 の利用者を収容できる。同じ条件で, 狭帯域方式なら 20 MHz, 10 kbps の条件で 1,000 の利用者を収容できる。しかし, この場合, それぞれのセルに 20 MHz の帯域全部を割り当てることはできない。セルあたりのスペクトル効率を求めるには, 孤立したセルの結果を, 一つのクラスター中のセルの数で割る必要がある。クラスターの大きさが10なら, セルあたりの利用者数は, 狭帯域もSS方式も共に 100 となる。クラスターの大きさが10より小さければ, 狭帯域が優位で, それ以上のときは, SS方式の方が良い。FH-MFSK なら更に性能が改善する。

CDMA の商用システムを完成する前に解決すべき問題が残っている。フェージングに相関がある場合、あるいは、電力制御の動作誤差による性能劣化や、その制御情報の伝送手段など、より現実的な性能評価が必要である。しかし、これらの解析は非常に複雑になる。

非同期 CDMA の移動通信における周波数利用効率、前提とするシステムの条件により大きく変わる。FCC も、SS 方式と他の方式の周波数利用効率の優劣についての議論を避け、最終的な評価はなされていない。

5.4 多重化方式の比較

第7表に、各多重化方式を陸上移動通信に用いる際の特徴を示す。CDMA では、拡散変調に FH 方式を使用した場合を中心に考えている。

SS 方式のフェージングに対するダイバーシチ効果は、送受信機のみで得られ、アンテナ等での対策を必要としない。また、その改善も非常に大きい。この効果は広い周波数帯域を使用することによって得られ、SS 方式が潜在的に有する特徴と考えられる。FDMA や TDMA では、変復調方式でなく、アンテナ等での改善を考えている。無論これらは SS 方式でも使用できる。

一般に移動通信は、マルチパスの遅延広がりによって、高速のデータ伝送が制限を受ける。特別の対策を施さなければ、100 kbps-200 kbps が限界であろう。したがって、大きな多重度をもつ TDMA の実現はそのままでは困難である⁽¹¹⁹⁾。これを解決するために、イコライザや指向性ダイバーシチ、あるいはマルチキャリア方式の提案もある⁽¹¹⁸⁾。しかし、この点では同期 FH/CDMA の方が有利である。

個人所有の簡易な無線機で受信できないという意味での秘話性は、SCPC 移動通信でもデジタル化によって達成し得る。また、DES 暗号などが LSI で1チップ化され^{(29)~(32)}。高度な暗号も簡単なハードウェアで実現されつつある。これらは当然 SS 方式とも併用でき、SS 方式の秘話性は信号の秘匿性も含め、より高度なものである。

通信理論の面からみて、広帯域変調は狭帯域変調より性能を向上できる。CDMA への応用では、個々のユーザがシステムとして得られる全帯域を利用することができ、多重化してもそれ以上の帯域を必要としない。また、広い帯域をすべて使うことにより、符号化の自由度は極めて大きい。同期 CDMA はこの特長をそのままシステムの利点にできるが、非同期 CDMA では、広帯域を使用することによる通信品質の改善が、他局干渉による劣化を上回るかどうかで評価が定まる。

遠近問題や多元接続時の性能は、システムのチャンネル間の直交性に依存する。SS 方式による非同期の多元接

続の場合、チャンネル間が直交しないため、同時通話者数が少くなる。また、非同期 CDMA で、システムの能力を最大限に発揮させるには、遠近問題に対して、電力制御が必要となる。これはシステムのコストを引き上げることになる。

非同期 CDMA は、このように、ネットワークの制御コストと伝送効率の比較で、その有用性が決まる。伝送効率が悪ければ、むしろ、コスト増になっても TDMA の方が有利かもしれない。実際、衛星回線では CDMA でも電力制御が通常行われている。ネットワークプロトコルも、ALOHA のように、制御を必要としないが効率が悪く、潜在的に不安定な方法から、デマンド割当てを行う衝突回避型プロトコルへ移ってきた。更に、擬似雑音キーを、ネットワークに分散させねばならず、それぞれの局は、チップ時間以内に同期をとらねばならない⁽²²⁾。

しかし、FH 方式のセルラー移動通信では、5.3 で述べたように、条件によっては、現在の FDMA システムより効率が良くなる。また、会話がとぎれたとき電力を送信しなければ、非同期 CDMA では同時通話者数を2倍にできるが、FDMA、TDMA ではそうはならない。さらに、多元接続のための制御専用チャンネルを必要としない利点も大きい。

理論上、直交している多重化方式でも、ハードウェア上の制約から、チャンネル間の干渉を生じ、ガードタイムやガードバンドが必要となる。非同期 CDMA での干渉は、方式そのものに由来し、完全な除去は困難である。

CDMA の基地局の導入のコストは、SCPC に比べ、非常に高価になる可能性がある。これは単に技術が成熟していないというだけでなく、それぞれの基地局が、用いられるすべての周波数ホッピング系列を扱わなければならないからである。これは克服できないような問題ではないが、基地局の設計が、始めからシステム全体を考えて、完成したものでなければならないことを意味する。TDMA でも同様の問題がある。狭帯域方式なら、わずかな単チャンネル無線機から始めて、需要の増加に合わせて増設していけばよい。ただし、非同期 CDMA は初めから基地局を用いずに運用することもできる。また基地局で、拡散、逆拡散を行わず、単に周波数変換を行うだけなら簡単な構成でよい。

受信機に、高速シンセサイザとフィルタ群か FFT 演算器を用いると、やはり高価なものになる。しかし、マッチドフィルタが普及し、商用に用いられるようになれば価格は下がるであろう。

CDMA による移動通信システムは、使用実績が非常に少なく、特に同期 CDMA は皆無に近い。このため装

置の最適設計や、運用上の未解決の技術的な問題が残っている。TDMAによる陸上移動通信も、机上での検討段階で、同様の問題がある。従来、移動通信系は簡易なシステムが多かったため、衛星や地上固定回線で用いられている高価で複雑な技術を応用するには、これらの問題を解決しなければならない。

6. SS 移動パケット通信

パケット通信はコンピュータ通信などに適している。これは、通信のバースト性 (Bursty nature) による。コンピュータ通信はそう頻繁に行われるわけではないが、一度、通信が始まると、かなり早い応答が要求される。FDMA や TDMA は直交性が保証されているが、バースト的な通信に対して、ピークの伝送速度を満足するようにすると、チャンネルの利用効率が低い。

パケットの信号には、狭帯域信号と SS 信号の二通りが考えられる。SS 変調はパケット通信に絶対に必要な条件ではないが、利点は多い。最も大きな特長は、Capture 効果 (他の重複するパケットがあっても、受信に成功する能力)⁽¹²³⁾ であろう。狭帯域信号の場合、二つのパケットが時間的に重なっているとき、どちらも破壊されるが、SS 信号の場合、Capture 効果により失われることはない。

また、マルチパスに強いという特長は、特に陸上移動通信には有効である。一般に陸上移動通信では、長いバースト誤りが発生し、これを改善するには、インタリーブや長い拘束長をもつ符号が必要になる。しかし、パケット通信でデータの継続時間が短いと、これらを有効に使えない場合がある。SS 方式により、マルチパスによる符号間干渉を除くことができ、高速データ伝送が可能となる。DS の Rake 方式や、フェージングに対して誤りをランダム化できる FH 方式が有効である。他に、干渉を受けにくい、干渉を与えにくいなどの特長も有効である。

現在、実際に運用されているのは、ALOHA と PRNET⁽¹²²⁾ である。PRNET については、三つの実験システムが米国内で用いられている。主な用途は軍用である。PRNET は ALOHA の拡張版で、移動体間の直接の通信や、運用中の周波数帯での使用者の共存、マルチパスやジャミングからの保護などが特長である。DS 方式で、情報ビット速度は 90 kbps 又は 360 kbps 拡散帯域は 140 MHz (RF で 1,710-1,850 MHz)、拡散変調には MSK を用いている。多重伝搬によるフェージングに対して PDI (Post Detection Integration) によるパスダイバーシチを行っている。

一般にパケット通信では、伝搬遅延が小さいときに

は、Carrier Sensing が有効である。しかし、SS 変調を行った場合には、Capture 効果により、パケットの衝突の影響が小さいため、Carrier Sensing は必ずしも必要ない。ただ、Carrier Sensing により、他局干渉による背景雑音を軽減でき、ジャミングのある環境では有効である。SS 信号では、RF の電力を直接測定することができず、Carrier Sensing では、どれかのパケットに受信機がロックしているかをみて、判断する必要がある。

従来、パケット通信の主な研究テーマは、交換やプロトコルの問題であり、通信工学よりも情報科学者によって扱われてきた。回線として、主に UHF の見通し内回線や SHF 衛星回線が対象で、誤りはパケットの衝突のみにより起こるものと考えている。しかし、移動パケット通信の場合は、伝送路が大きな障害となる。パケット交換と通信回線との研究分野の協力が必要になろう。移動パケット通信の実用化には、まだ検討課題が多いが、SS 方式が有力な手段となろう。

なお、無線パケット通信の最近の解説として、文献(124)~(126)が挙げられる。

7. 構内移動通信への応用

室内や構内で微弱あるいは微小電力の小規模な無線設備を用いた通信を構内移動通信と呼ぶ⁽¹³³⁾。今後、構内ページング、無線移動端末、テレメータ等様々な用途での普及が予想されている^{(41), (134)}。これらは、陸上移動通信の小規模かつ簡易なシステムとも考えられるが、次に挙げる独自の特徴も有している。

- (1) 送信電力が制限されているため、他の局から妨害を受けやすい。
- (2) 他局への妨害に対して厳しい規制がある。
- (3) 室内、工場内等、陸上移動通信の場合と同様、悪い電波伝搬環境で用いられる場合が多い。

これらの問題に対して、スペクトル拡散方式は有効な解決法となり得る。そのため、各国で方式や装置の研究開発が進められ、SAW などのデバイス技術による小形化も図られている^{(127), (24), (135), (136)}。ここでは二、三の例を紹介する。

7.1 構内移動通信の多重化方式

構内移動通信は、送信電力が小さく、また、エリア間が構造物で隔てられ、お互いの干渉が比較的小さい。このため、一般の陸上移動通信に比べ、利用可能な周波数帯にゆとりがある事が多い。すなわち、伝送可能な情報量に比べ、実際に送られている情報量が非常に少ない低トラヒックの状態である。このとき、FDMA や TDMA では、多くのチャンネルが空いていることになる。しか

第 8 表 室内無線通信システムの比較

	IR	IR/SS	RF	RF/SS
1. Interference with existing systems	None	None	Large	Small
2. Mobility (shadowing or fading)	Good	Good	Better	Best
3. Detectability outside the office	None	None	Some	Little
4. Range	Low	Low	Medium	Medium
5. Data Rate	Low	Low	Medium	Medium
6. Cost	Low	High	Medium	High
7. Effected by Ambient light	Yes	Some	No	No
8. Interception Resistance	No	Yes	No	Yes
9. Random Multiple Access	No	Yes	No	Yes
10. Selective Addressing	No	Yes	No	Yes

し、CDMA では、それぞれの利用者は、利用できる帯域をすべて用いて通信でき、拡散による耐干渉性、耐雑音性などの利点を得られる。さらに SS 方式は、マルチパスやフェージングに強く、端末の移動中も含め、信頼性の高い通信ができる利点もある。

構内移動通信では、DS が主で、FH はほとんど検討されていない。これは、コストを下げることで、トラヒックが低く、遠近問題の考慮が必要ないという前提があるからである。将来、トラヒックが増えれば、FH も検討対象になるであろう。

第 8 表に、室内無線通信システムの比較⁽¹³⁰⁾を示す。赤外線 (IR)、赤外線スペクトル拡散 (IR/SS)、無線 (RF)、無線スペクトル拡散 (RF/SS) の比較である。スペクトル拡散を行うことにより、干渉に強く、ランダムアクセスが可能になる。しかし、コストが増大する。

7.2 装置例

7.2.1 SAW 相関器を用いた無線データリンク⁽¹²⁷⁾

ここで述べるデータリンクは、仕切りのない大きな建物の中で、計算機や端末間の無線によるデータ通信を行うためのシステムである。DS 方式をマルチパスの排除のために用いている。また、SAW (表面弾性波) 相関器を用いて信号の変動の影響を減らし、初期接続時間を改善している。この装置は室内の狭い範囲で運用するように設計されている。送信電力は非常に小さい。このようなシステムは、同軸や光ファイバケーブルを用いたシステムに比べ、次のような利点がある。

- (1) どこにでも端末を置くことができ、事前の配線は必要でなくなる。
- (2) ネットワークと接続したまま、端末を自由に移動できる。

このような利点を完全に生かすには、マルチパス対策がまず必要である。マルチパスによるフェージングによって、従来の狭帯域信号は、25 dB 以上減衰する。これを克服するには、送信電力が帯域幅を増大しなければならぬ。ここで述べるシステムでは、DS 方式によって

得られる広帯域信号を用いている。

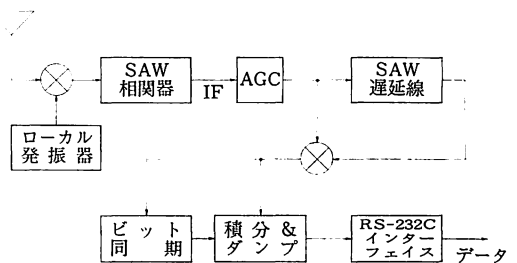
この方式の有効性を試験するために、次のような性能の装置を製作した。

データ速度	100 kbaud
符号長	255 bytes
符号速度	25.5 Mbps
キャリア周波数	1.5 GHz
変調方式	BPSK (DS 方式)
帯域幅	51 MHz
送信電力	5 mW
動作範囲	300 m

上で述べた動作範囲は、多くの用途に相当であるが、送信電力を大きくすれば、更に広げることができる。例えば、50 mW の出力なら、1 km の範囲で使用できる。

便宜上、既存のソフトウェアとファームウェアからなる multipoint polling protocol を用いる。送受信機には RS-232-C インターフェイスが装備され、高速同期式モデムとして動作する。

当初は、マイクロプロセッサを基本とした受信機を用いていたが、この方式は、人間が伝搬経路を横切ったときなどに起こるマルチパスの変動に弱く、100 ms の接続時間がチャネル伝送効率を著しく劣化させる。これらの障害は、SAW 相関器を用いた受信機 (第12図) によ



第12図 SAW 相関器を用いた室内データ通信受信機

り解決された。

受信信号は、350 MHz の IF 信号に変換され、相関器で復調される。データは DPSK 変調され、その情報は、相関器出力の、相対的な位相として得られる。次に、正確に1ビット長の SAW 遅延線によって遅延コヒーレント検波を行う。重要な遅延線検波器の特長は、キャリアの位相に相関がないような、異なる経路を経た信号を復調できることである。検波器の出力は、相関ピークを中心とした $2\mu\text{s}$ の時間幅で遅延線積分される。このようにして、すべての経路の電力を受信機で集め、トータルの信号電力でデータビットの決定を行う。

初期接続時間は AGC ループの引込み時間によって制限され、この装置では約 1 ms である。これはポーリングを行う2台の端末のネットワークには、適当な値である。ポーリングの回数は 50回/秒である。SAW 相関器によって、初期接続時間を 1/100 に短縮でき、100 kbaud のデータ速度でシステムを運用することが可能になった。

7.2.2 コードレス電話用無線機⁽¹²⁸⁾

NTT では、コードレス電話への SS 方式の利用についての実験を行った。SS 方式を用いるのは、多元接続と干渉除去に優れているからである。主な諸元を以下に示す。

音声符号化	ADM (適応デルタ変調)
データ速度	32 kbaud
符号長	127 bits
符号速度	4.064 Mbps
キャリア周波数	2.20 GHz (下り回線) 2.18 GHz (上り回線)
変調方式	BPSK (DS 方式)
送信電力	3 μW

また、送信電力制御を行ったときの割当て可能な利用者数を計算機シミュレーションで求めると、トラヒックが小さければ、割当て可能な利用者を増加でき、コードレス電話のような個人的な通信に、SS 方式が適していることが明らかになった。

AT & T でも、室内無線通信に DS 方式を用いる場合の理論検討が行われている⁽¹³¹⁾。

また、電波研究所でも移動通信用 SSFH2 装置による室内データ伝送実験を行った⁽¹²⁹⁾。

7.2.3 自動倉庫システムの通信制御⁽¹³²⁾

無人搬送台車やクレーンの通信制御のために SS 方式が用いられている。雑音に強い、他の通信に干渉を与えにくいなどが SS 方式採用の理由である。主な諸元を以

下に示す。

データ速度	10 kbaud
符号長	127 bits
符号速度	10 Mbps
キャリア周波数	VHF, UHF 帯
変調方式	BPSK (DS 方式)
送信電力	微弱
動作範囲	約 150 m

8. FCC の動向

FCC は1979年から、SS 方式の民間利用に関する検討を行ってきた。まず、MITRE Corporation に、調査を依頼した。その結果を参考に、1981年以降、メーカーや通信業者、利用者、SS 方式の利用拡大についての意見を求めた。その結果が集約され、1984年5月に委員会の承認を受けた⁽³⁷⁾。これに基づき、FCC は1985年5月に SS 方式の部分的使用を認可した^{(38)~(40)}。以下に、調査告示と認可の概要を説明する。

8.1 調査告示⁽³⁷⁾

1984年に FCC から発表された SS 方式の利用拡大に関する調査告示の中から主な提案を挙げる。

- (1) SS 方式は、70 MHz 以上の任意の周波数で、拡散帯域に制限もなく使用できる。ただし、特定の周波数帯 (ISM band: 902-928, 2400-2483.5, 5725-5875 MHz) を除いて、送信電力を制限する。
- (2) FH 方式の場合、30以上の周波数を用い、どの周波数も1秒以内の継続時間ならば、現行の微弱無線局の規制電力を適用できる。ただし、TV チャンネルと重なる周波数を用いる場合は規制を厳しくする。
- (3) DS 方式は、使用帯域全部を連続的に占有するため、TV への干渉を基準に、別に規制値を定める。
- (4) (1)で述べた ISM band では、送信電力を制限しない。この帯域の使用法について業界に意見を求めている。
- (5) 警察に対しては、秘話性、耐干渉性等から、Public safety band での FH 及び DS の使用を認める。
- (6) 微弱 SS 方式を従来の無線システムと共用した場合、従来のシステムが干渉を受けることもあり得る。特に、Public safety radio service に対しては、技術基準等の面で干渉を最小限に抑えるようにする。
- (7) wireless data terminal は SS 方式の適用が最も期待される分野である。また、wireless microphone や cordless phone も成長が期待できる。
- (8) SS 信号の電界強度等は、従来の方法では測定できない。そこで、SS 信号に対応できる測定法の提案も求

めている。

8.2 調査告示への回答

1984年の調査告示への回答によると、その多くが、SS方式の導入が既存の方式に干渉を与えることを懸念し、周波数と電力の割当てに十分注意することを望んでいる。また、多くの回答者は、この方式があまり知られていないことを理由に、測定法や干渉許容量のアセスメントが得られるまで、実施を慎重に行うことを主張している。既存のサービスとSS方式の周波数帯を共用することには強く反対しているが、電力と使用範囲を制限すれば、ほとんど反対はない。具体的な告示に対するコメントを以下に示す。

放送局やRCA, GEなどは、SS方式を重ねて用いることにより、現在のTV放送の品質が大きく低下することを指摘している。

COMSAT, STC, ATTはマイクロ波回線や移動、衛星通信サービスが、特に広帯域の場合に影響を受けやすいことを心配している。

米国アマチュア無線連盟は、特に142-146, 220-225, 420-450 MHz帯が干渉を受けることを懸念している。アマチュア無線の多くは居住地で運用されていること、しばしば検出限界ぎりぎりの弱い信号を扱っていることを理由として挙げている。

ワイヤレスデータ端末として用いる場合、HPは、提案(33 $\mu\text{V}/\text{m}$ at 3 meters per 4 MHz)に比べて、10倍の電力が必要だと述べている。

HPの行ったキャリア電流SSシステムの実験により、この方式が非常に有望であることが明かになった。この方式が、AC電力線から直接でなく、トランスから電力が供給されている大きなビル内や、ビルの一區画に限定されている限り、他のサービスには、ほとんど影響を与えない。このシステムは、20 MHz以下のキャリア周波数に限られ、それ以上では、損失が極めて大きくなる。

測定方法については、現在のところ、ほとんどコンセンサスが得られていない。まず測定帯域を明確にすべきだという点では、意見が一致している。

幾つかのコードレス電話のメーカーは、SSシステムの提案により、900 MHz帯での、2 MHzの帯域の使用の請願が不利になるのではないかと考えている。

8.3 FCC規則 Part 15 と 90 に基づくスペクトル拡散方式の認可⁽³⁸⁾

今回認可されたのは、警察無線への使用と、ISM帯域での使用である。

8.3.1 警察無線におけるSS方式

警察は秘話性や耐干渉性から、FH方式を2 W以内

の出力で使用できる。DS方式は軍以外では一般に知られていないので、恒久的認可は延期し、開発に必要な臨時の免許を、警察や製造業者に与える。

8.3.2 ISMバンドでのSS方式

最大の送信電力は1 W以内に制限される。帯域外のどの100 kHzの電力も、希望波の最大レベルの存在する帯域内のどの100 kHz内の電力よりも20 dB低くしなければならない。SSシステムは、他の用途に対して、どんな妨害も与えてはならない。さらに、他の用途から受ける妨害を許容しなければならない。

FH方式を用いる場合、75以上の周波数を25 kHz以上の間隔で用いなければならない。さらに、どの周波数も、30秒の間に、1/4秒以上占有してはならない。DS方式の場合、6 dB帯域幅は、500 kHz以上なければならない。

COMSATから5850-5875 MHzの固定衛星業務に干渉を与える恐れがあるとの意見がでたので、この周波数帯は除外した。

NTIAとGEは、最大出力を7 Wにしても大きな困難はないと述べている。しかし、GEは例外として、干渉からある程度保護されているような通信システムを挙げている。このようなシステムがISMバンドで定常的に使われるようになると、ISM装置からの干渉保護が要求されるようになるかもしれない。このことは、石炭の脱硫黄化や食品の殺菌などの、新しい用途の開発を阻害するかも知れない。この点を考慮して、今回は、電力を1 W以内に制限することにした。

9. SS移動通信の課題と展望

9.1 検討課題

ここまで述べてきたように、ここ数年の間に、陸上移動SS通信は大きな発展を遂げた。しかし、広く実用化するには解決すべき課題が幾つかある。以下に検討課題を挙げる。

(1) SS方式のハードウェアはSAWデバイス等の半導体素子の発達もあって、技術的にはかなり完成し、民生用レベルでも十分使用可能になってきた。また、高速切替えが可能なシンセサイザも市販され、FHも特殊な技術ではなくなってきた。しかし、生産コストは今後の問題である。

(2) FHのホッピングパターン等、拡散のための符号化の問題は、ほぼ解決された。現在は、一次変調の符号化や信号処理が主な研究対象である。特にSS方式の広帯域性を生かした高効率の一次復調技術が期待されている。

Shanonによって広帯域で情報を伝送することにより

誤りを幾らでも小さくできることが示され、SS方式がその例に出される。しかし、SS方式のように情報変調と拡散変調を分離する方式では、改善に限界があり、2段階の変復調を相互に関連させる2重符号化なども期待される。

(3) 現在のところ、SS方式と既存の通信システムとの間で帯域を共用することには、反対意見が多い。これに関しては、干渉等の面から十分な研究が必要である。

(4) 拡散方式の標準化、無線周波数、拡散符号の割当て等の検討が必要である。また、監視方法、SS信号の電界強度の測定法等の検討も必要である。

(5) 同じ周波数帯で非同期CDMAの全2重(FULL DUPLEX)通信ができるかどうかにも興味を持たれている。遠近問題の極限のような状態だけに、一般には、不可能と考えられている。

9.2 SS方式の研究が他の分野に与えたインパクト

SS方式の研究と平行して、研究が大きく進み、相互に影響を与えてきた分野も多い。以下にその例を示す。

(1) デジタル移動通信の研究

SS方式とはほぼ同時期にSCPC方式のデジタル移動通信の研究も始まっていた。特に広帯域伝送時の選択性フェージングの影響に関する考え方は共通していた。

また、セルラー方式の移動無線の周波数利用率の研究にも重要な役割を果たした。さらに、陸上移動伝搬路の研究に有効な手段を提供した。

(2) 高周波用デバイスの開発

特に、民生用のSAWデバイスの開発を促した。トップ付遅延線、コンボルバ(24), (135), (136)などが挙げられる。

(3) 符号理論、信号理論の無線通信への応用

拡散符号の研究、接続符号との関連、無線通信への符号理論の応用など、符号理論、信号理論の分野に実用化につながる新しい研究テーマを提供した(148)。

(4) 多重化の視野を広げた。

従来の時間や周波数領域での多重化に加え、新たに、符号領域での多重化という考え方を示した。パケット交換網、LANなどの研究分野でも注目された。

他に、符号分割多重方式を生物の遺伝子間の情報伝送と対応させようという考え方も示された(149)。

9. 将来の展望

第9表に、地上通信系でのSS方式の適用分野を示す(86)。昭和56年当時の資料であるが、現在、最も実用化に近いのは、表中の「その他の項」(家電コントロール)で代表される微小電波機器であろう。陸上移動通信

第9表 SS方式の地上通信系での適用分野

	具 体 例		利用するSS方式の 主な特長	基 地 ・ 中 継	*移動 速度	問 題 点 等
	対 象	変 調 形 式 1次/2次				
公衆移動通信方式	自動車電話	DPSK/FM	個別アドレス利用 耐干渉性、秘話性	有	A C	周波数有効利用、遠近問題、電力制御、伝搬特性、品質管理、同期、デバイス、経済性、信頼性
	携帯電話					
	コードレス電話		周波数監視の容易さ 秘話性	無(有)	B C	使用形態の制約 同上
専用移動通信方式	警察、消防等の無線電話	SCPDM/DS	秘話性、耐干渉性、測距	有(無)	A C	遠近問題、電力制御、同期、一斉呼出しの特定コードの必要性
	災害時緊急通信		他のシステムとの共存 混信回避	有	A C	個別端末の場合には問題なし
個人通信方式	簡易無線市民ラジオ		多くの個別アドレス利用 耐過負荷性	有(無)	A C	遠近問題、電力制御、中継局の設置
	ワイヤレスマイク、インターホン		混信回避、秘話性 チャンネル切替不要	無	A C	コストダウン、同期、大きさ
その他 (家電コントロール)	データ通信	DS	他のシステムとの共存 耐干渉性	有	A C	同期、ルートの選定
			混信回避	無	B C	コストダウン

* A=走行, B=歩行, C=静止

への適用についても、基本技術は十分完成されて、警察等の一部の用途には、使用されている。しかし、広く使用されるには、システムの最適設計、既存の方式との比較、使用周波数帯などの面で、技術上、行政上の課題が残されている。

電波が有効に用いられるということは、その周波数帯が常に用いられることだと考えられている。しかし、この場合、回線が常にふさがっていることになる。専用回線なら問題はないが、多くの利用者が共用する場合、各利用者が好きなときに通話できない可能性がある。例えば、パケット通信の場合、再送が集中して、回線が飽和することもある。回線を提供する側にとっては、回線が常に用いられることが望ましいが、無線通信が個人に普及するに従い、利用者にとって、どのような状態が望ましいかという視点から、電波の有効利用を見直す必要がある。

待ち時間を少なくして、自由に通話できるようにするには、トラヒックに比べて回線の収容力が十分大きくなければならない。そのためには、変復調、多重化、網の構成などを総合的に研究する必要がある。例えば、無線回線の多重化、変復調方式をアダプティブに用いるようにできれば、トラヒックが小さいときは、SS 変調により高品質を提供できる。無線通信の形態が多様化するに従い、ますます、広い視野から可能性と最適化を検討する必要がある。

10. あとがき

約10年前には、移動無線の技術者、研究者にとって、スペクトル拡散方式は異質のものに感じられた。しかし、しだいに、広帯域デジタル伝送や多元接続など、共通の考え方が認識されてきた。例えば、学会での発表の際、初めのうちは、スペクトル拡散方式が一つのセッションに集まっていたが、最近では、衛星、移動通信などのセッションで発表されることも多い。また、最近発行された通信方式の教科書には、必ず、スペクトル拡散方式の説明がある。このように、スペクトル拡散方式の認識は非常に高まってきた。

従来、用途が限定されていた SS 方式は、米国を中心に様々な分野に使われようとしている。このような時期に、本論文で試みたように、SS 方式を様々な角度から見直すことによって、新しい実用段階の展望が開けるものと考えられる。

謝 辞

本稿は、筆者が様々な機会に発表した内容を、系統的にまとめたものである。まとめにあたり、ご指導頂い

た、鈴木総合通信部長と猿渡通信系研究室長に感謝します。

略語一覧

ADM	: Adaptive Delta Modulation
AGC	: Automatic Gain Control
B-	: Binary-
BPF	: Band-pass Filter
CATV	: Community Antenna Television
CCD	: Charge Coupled Device
CCIR	: Comite Consultatif International des Radio Communications
CDMA	: Code Division Multiple Access
CSMA	: Carrier Sense Multiple Access
CW	: Continuous Wave
D-	: Differential-
DES	: Data Encryption Standard
DS	: Direct Sequence
DSP	: Digital Signal Processing
FCC	: Federal Communications Commission
FDMA	: Frequency Division Multiple Access
FEC	: Forward Error-correcting
FFT	: Fast Fourier Transform
FH	: Frequency Hopping
FSK	: Frequency Shift Keying
GPS	: Global Positioning System
IEEE	: Institute of Electrical and Electronics Engineers
IF	: Intermediate Frequency
IR	: Infrared Rays
ISM	: Industrial, Scientific, and Medical
LAN	: Local Area Network
LPF	: Low-pass Filter
LSI	: Large Scale Integrated circuit
M-	: Multilevel-
MCA	: Multi-Channel Access
MSK	: Minimum Shift Keying
NTIA	: National Telecommunications and Infor- mation Administration (U. S. Dept of Commerce)
PAMA	: Pulsed Address Multiple Access
PDI	: Post Detection Integration
PN	: Pseudo-Noise
PSK	: Phase Shift Keying
Q-	: Quaternary

RADA : Random Access Discrete Address
 RF : Radio Frequency
 SAW : Surface Acoustic Wave
 SCPC : Single Channel per Carrier
 SHF : Super High Frequency
 SIR : Signal to Interference Ratio
 SS : Spread Spectrum
 SSB : Single-SideBand
 SSMA : Spread Spectrum Multiple Access
 SSRA : Spread Spectrum Random Access
 TDMA : Time Division Multiple Access
 TDRS : Tracking and Data Relay Satellite
 TH : Time Hopping
 UHF : Ultra High Frequency

参 考 文 献

1. 解説書, 論文集, 特集号
- (1) R. C. Dixon, Spread Spectrum Systems, John Wiley & Sons., 1976 (改訂版, 1984). (立野 敏, 片岡志津雄, 飯田 清 訳, スペクトラム拡散通信方式, ジャテック出版, 1978).
- (2) J. K. Holmes, Coherent Spread Spectrum Systems, Wiley, New York., 1982.
- (3) M. K. Simon, J. K. Ohmura, R. A. Scholtz, and B. K. Levitt, Spread Spectrum Communications, 1-3, Computer Science Press, 1985.
- (4) R. C. Dixon (ed.), Spread Spectrum Techniques, IEEE Press, 1976.
- (5) Special Issue on Spread Spectrum Communications, IEEE Trans. COM-25, Aug. 1977.
- (6) Special Issue on Mobile Spread Spectrum Communications, IEEE Trans. VT-30, Feb., 1981.
- (7) 昭和56年度電子通信学会総合全国大会講演論文集, 分冊10, 1981. 4.
- (8) Special Issue on Spread Spectrum Communications, IEEE Trans. COM-30, May 1982.
- (9) C. E. Cook, F. W. Ellersick, L. B. Milstein, and D. C. Schilling (ed.), Spread-Spectrum Communications, IEEE Press, 1983.
- (10) Special Issue on Progress in Military Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-3, 5, Sept. 1985.
- (11) Special Issue on Progress in Military Communications, IEEE Journal on Selected Areas in Communications, SAC-4, 2, March 1986.
2. SS 方式一般解説
- (12) D. Carn; "Cryptology and the Origin of Spread Spectrum", IEEE Spectrum, pp. 70-80, Sept. 1985.
- (13) R. A. Scholtz; "The Origins of Spread-Spectrum Communications", IEEE Trans. Commun., COM-30, 5, pp. 822-854, May. 1982.
- (14) R. A. Scholtz; "Notes on Spread-Spectrum History", IEEE Trans. Commun., COM-31, 1, pp. 82-84, Jan. 1983.
- (15) R. Price; "Further Notes and Anecdotes on Spread-Spectrum Origins", IEEE Trans. Commun., COM-31, 1, pp. 85-97, Jan. 1983.
- (16) W. R. Bennett; "Secret Telephony as a Historical Example of Spread-Spectrum Communication", IEEE Trans. Commun., COM-31, 1, pp. 98-104, Jan. 1983.
- (17) 松尾良雄; "スペルッドスペクトラム通信", 電子科学, pp. 89-97, 1978. 11.
- (18) 横島一郎; "スペクトラム 拡散 通信方式=その原理と応用=", エレクトロニクス, pp. 481-492, 1979. 5.
- (19) 角川靖夫, 塚本賢一; "スペクトル 拡散 通信方式とその適用分野 (I)", 信学誌, 65, 9, pp. 965-971, 昭和57年9月.
- (20) 角川靖夫, 塚本賢一; "スペクトル 拡散 通信方式とその適用分野 (II)", 信学誌, 65, 10, pp. 1053-1059, 昭和57年10月.
- (21) 水野光彦; "スペクトル拡散通信", 電気通信時報, 2, 8, pp. 59-64, 1985. 8.
- (22) J. Viterbi; "When not to spread spectrum-a sequel", IEEE Communications Magazine, 23, 4, pp. 12-17, April 1985.
- (23) J. G. Proakis; "Digital Communications", McGraw-Hill, 1983. Chap. 8.
- (24) S. S. Rappaport and D. M. Grieco; "Spread-spectrum signal acquisition: methods and technology", IEEE Communications Magazine, 22, 6, pp. 6-21, June 1984.
- (25) D. V. Sarwate, and M. B. Pursley; "Cross Correlation Properties of Pseudo-random and Related Sequences", Proc. IEEE, 68, 5, pp. 593-619, May 1980.
- (26) G. Solomon; "Optimal Frequency Hopping Sequence for Multiple Access", Proc., 1973, Symp. of Spread Spectrum Communications, 1,

pp. 33, Mar. 1973.

- (27) 谷本, 住吉, 駒井; “変形M系列を用いた同期式スペクトル拡散多重通信方式”, 信学論, **J67-B**, 3, pp. 297-304, 1984. 3.
- (28) 朱, 野村, 山田; “直交系列を用いる SSRA 通信方式の特性”, 信学論, **J68-B**, 3, pp. 319-326, 1985. 3.
- (29) R. C. Fairfield, A. Matusevich, and J. Plany; “An LSI Digital Encryption Processor”, IEEE Communications Magazine, **23**, 7, pp. 25-29, July 1985.
- (30) 中村勝洋, 岡本栄司; “通信のセキュリティ, 信頼性と VLSI”, 信学誌, **69**, 2, pp. 136-140, 昭和61年2月.
- (31) 岩垂好裕; “暗号のアルゴリズム”, 信学誌, **69**, 4, pp. 364-369, 昭和61年4月.
- (32) “電波の有効利用政策に追いつけない無線通信のセキュリティ確保策”, 日経コミュニケーション, **15**, pp. 31-36, 1986. 7. 28.
3. 政府文書など
- (33) 昭和44年度電波技術審議会答申第2編第2章「周波数と時間スロットとの組み合わせにより局コードを構成し, この局コードによって情報を伝送する方式(RADA方式)による無線通信の技術的諸問題について」, 昭和45年3月.
- (34) CCIR Study Programme 18B/1, Report, 207, 209, 1978.
- (35) “Spread Spectrum Techniques”, CCIR, Report, 651-1, 1986.
- (36) 昭和55年度電波技術審議会答申第5編第3章「スペクトラム拡散方式を用いた電波の利用開発に関する技術的諸問題」, 昭和56年3月.
- (37) “Proposed Rulemaking for Spread Spectrum Authorization”, FCC Docket 81-413, May 1984. (also reprinted in IEEE Vehicular Technology Society Newsletter, Aug. 1984.)
- (38) Federal Register; “Authorization of Spread Spectrum Systems Under Parts 15 and 90 of the FCC Rules Regulations”, **50**, 117, June 18, 1985.
- (39) Michel J. Marcus; “Recent U.S. regulatory decisions on civil uses of spread spectrum”, proc. GLOBECOM '85, pp. 504-506, Dec. 1985.
- (40) David B. Newman, Jr.; “Communications and the law, FCC authorizes spread spectrum”, IEEE Communications Magazine, pp. 46-47, July 1986.
- (41) 昭和58年度電波技術審議会答申第3編「微弱無線機器に関する技術的諸問題」昭和59年3月.
4. SS 陸上移動通信関連の個別論文
- (42) G. R. Cooper, R. W. Nettleton, and D. P. Grybos; “Cellular land-mobile radio: why spread spectrum?”, IEEE Communications Magazine, pp. 17-23, March 1979.
- (43) O. C. Yue, “Spread Spectrum Mobile Radio, 1977-1982”, IEEE Trans. **VT-32**, 1, pp. 88-105, Feb. 1983.
- (44) G. R. Cooper and R. W. Nettleton; “Cellular mobile technology: the great multiplier”, IEEE spectrum, pp. 30-37, June 1983.
- (45) W. W. Chapman; “Spread spectrum application to mobile radio: past, present and future”, IEEE Vehicular Technology Newsletter, pp. 27-30, Feb. 1985.
- (46) S. C. Gupta, R. Viswanathan, and R. Muammar; “Land Mobile Radio Systems—a Tutorial Exposition”, IEEE Communications Magazine, **23**, 6, pp. 34-45, June 1985.
- (47) 横山光雄, 猿渡岱爾; “スペクトル拡散移動通信”, 信学誌, pp. 1214-1218, **68**, 11, 1985. 11.
- (48) G. R. Cooper and R. W. Nettleton; “Efficient Spectrum Utilization with Wideband Signals”, Final Report, Purdue University, Dec. 1976. (要旨は, G. R. Cooper and R. W. Nettleton; “A Spread-Spectrum Technique for High-Capacity Mobile Communications”, IEEE Trans. Veh. Technol., **VT-27**, 4, pp. 264-275, Nov. 1978.) また, 計算の誤差を修正した論文が, R. W. Nettleton and G. R. Cooper; “Performance of a frequency-hopped differentially modulated spread-spectrum receiver in a Rayleigh fading channel”, IEEE Trans. Veh. Technol., **VT-30**, 1, pp. 14-29, Feb. 1981.
- (49) D. J. Goodman, P. S. Henry, and V. K. Prabhu; “Frequency-Hopped Multilevel FSK for Mobile Radio”, B. S. T. J., **59**, 7, pp. 1257-1275, Sept. 1980.
- (50) U. Timor; “Improved decoding scheme for frequency-hopped Multilevel FSK system”, B. S. T. J., **59**, pp. 1839-1855, Dec. 1980.
- (51) U. Timor; “Multistage decoding of frequ-

- ency-hopped FSK system”, B.S.T.J., 60, pp. 471-483, Apr. 1981.
- (52) U. Timor; “Multitone frequency-hopped MF SK system for mobile radio”, B.S.T.J., 61, pp. 3007-3017, Dec. 1982.
- (53) V.K. Prabhu and R. Steele; “Frequency-hopped Single-Sideband Modulation for Mobile Radio”, B.S.T.J., 61, pp. 1389-1411, Sept. 1982.
- (54) 浅野, 伊藤, 細川; “デジタル移動体通信方式について”, 昭和58年電気四学会連合大会予稿, pp. 4-6~4-9, 1983. 9. (細川他, 信学技報CS82-59).
- (55) 山田健次, 大黒一弘, 薄井秀則; “陸上移動伝搬路におけるスペクトル拡散信号伝送実験”, 信学論, **J-65B**, 3, pp. 342-343, Mar. 1982.
- (56) 水野, 守山, 角川; “Spread Spectrum Communication Systems for Land Mobile Radio”, IEEE でんし TOKYO, 22, pp. 54-57, 1983.
- (57) 守山栄松, 井家上哲史, 角川靖夫; “陸上移動用直接拡散通信装置の概要と基本特性”, 電波季, 30, 155, pp. 131-157, June 1984.
- (58) 水野光彦, 野上久国, 角川靖夫; “陸上移動通信用 SSFH 装置の概要と基本特性”, 電波季, 30, 154, pp. 49-60, March 1984.
- (59) 水野光彦, 野上久国; “陸上移動用周波数ホッピング通信装置の狭帯域干渉波による誤り率特性”, 電波季, 30, 157, pp. 247-254, Dec. 1984.
- (60) 関澤信也, 水野光彦; “フェージング伝送路における周波数ホッピング方式へのビットインターリーブの適用効果”, 電波季, 31, 159, pp. 71-85, June 1985.
- (61) 水野, 守山, 関澤, 柳光, 猿渡, 伊藤, 井家上; “車載用周波数ホッピング拡散通信装置の概要と基本特性”, 第7回情報理論とその応用研究会資料, 分冊1, pp. 270-275, 1984. 11.
- (62) 柳光広文, 水野光彦; “陸上移動通信用 FH 装置の走行実験結果—多元接続時の BER 特性—”, 昭和61年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 分冊10, 2358, pp. 10-91, 1986. 3.
- (63) 関澤, 守山, 水野; “陸上移動通信用 FH 装置の走行実験結果—同期特性—”, 昭和61年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 分冊10, 2357, pp. 10-90, 1986. 3.
- (64) 守山, 水野, 猿渡; “陸上移動用周波数ホッピング方式の概要と基本特性”, 信学技報, CS85-84, pp. 51-58, 1985. 9.
- (65) 吉田, 池上, 高井, 松芝; “多重波フェージング下におけるスペクトル拡散通信方式の誤り率特性に関する実験的検討”, 信学論, **J68-B**, 12, pp. 1516-1518, 1985. 12.
- (66) J.F. Pieper, J.G. Proakis, R.R. Reed, and J.K. Wolf; “Design of Efficient Coding and Modulation for a Rayleigh Fading Channel”, IEEE Trans. IT, **IT-24**, 4, pp. 457-468, July 1978.
- (67) D.M. Grieco, and W.C. Fifer; “Signal Processing for a Packet Radio in a Multipath Environment”, IEEE National Telecommunications Conference Record, pp. 25.4.1-25.4.8, 1979.
- (68) P. Freret, R.E. Eschenbach, D. Crawford, and P. Braisted; “Application of Spread-Spectrum Radio to Wireless Terminal Communications”, IEEE National Telecommunications Conference Record, pp. 69.7.1-69.7.4, 1980.
- (69) 水野光彦, 角川靖夫; “周波数ホッピング方式のダイバーシチ効果”, 電波季, 26, 139, pp. 659-670, Sept. 1980.
- (70) 水野光彦, 角川靖夫; “コヒーレント帯域幅を考慮した周波数ホッピング方式のダイバーシチ効果”, 信学論, **J64-B**, 8, pp. 753-760, 1981. 8.
- (71) 山田, 原島, 宮川; “周波数ホッピング符号系列とダイバーシチ効果の関係について”, 信学論, **J65-B**, 1, pp. 17-22, 1982, 1.
- (72) M. Mizuno, “Randomization Effect of Errors by Means of Frequency Hopping Techniques in a Fading Channel”, IEEE Trans. Commun. **COM-30**, pp. 1052-1056, May 1982.
- (73) 松本, 仙石, 阿部; “周波数ホッピング方式におけるダイバーシチ効果”, 信学論, **J66-B**, 12, pp. 1478-1485, 1983. 12.
- (74) M. Mizuno; “Experimental Investigation on the Performance of FH-FSK in Fading Channels”, Proc. GLOBECOM '83, pp. 1435-1439, Dec. 1983.
- (75) 井家上哲史, 守山栄松; “直接拡散方式のフェージング下における特性とパスダイバーシチ効果”, 信学技報, CS84-37, pp. 57-62, 1984. 6.
- (76) R. Price, P.E. Green, Jr., “A communication technique for multipath channels”, Proc. IRE, 46, pp. 555-570, Mar. 1958.
- (77) M. Mizuno, E. Moriyama, and T. Saruwatari; “Diversity improvement in FH-MFSK land mobile radio”, Proc. ISAP '85, II, pp. 569-572, Aug. 1985, Kyoto, Japan.
- (78) M. Mizuno and S. Sekizawa; “Comparative

- experiments on the error performance of frequency-hopping and bit-interleaving in fading channels", *J. RRL*, **33**, 139, pp. 65-74, July 1986.
- (79) S. A. Musa and W. Wasylikiwskyj; "Co-channel interference of spread spectrum systems in a multiple user environment", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-26**, pp. 1405-1412, Oct. 1978.
- (80) P. S. Henry; "Spectrum Efficiency of a Frequency-Hopped-DPSK Spread-Spectrum Mobile Radio System", *IEEE Trans.*, **VT-28**, 4, pp. 327-332, Nov. 1979.
- (81) O. Yue; "Frequency-hopping, multiple-access phase-shift-keying system performance in a Rayleigh fading environment", *B. S. T. J.*, **59**, pp. 861-879, July-Aug. 1980.
- (82) K. Yamada and K. Daikoku; "Error performance of frequency hopped D.P.S.K., system", *Electron. Lett.*, **16**, p. 305, Apr. 10, 1980.
- (83) O.C. Yue; "Hard-limited versus linear combining for frequency-hopping multiple-access systems in a Rayleigh fading environment", *IEEE Trans. Vehicular Technol.*, **VT-30**, 1, pp. 10-14, Feb. 1981.
- (84) O.C. Yue; "Performance of frequency-hopping multiple access multilevel FSK systems with hard-limited and linear combining", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-29**, pp. 1687-1694, Nov. 1981.
- (85) O.C. Yue; "Maximum likelihood combining for noncoherent and differentially coherent frequency-hopping multiple access systems", *IEEE Trans. Inform. Theory*, **IT-28**, pp. 631-639, July 1982.
- (86) R. Viswanathan and S.C. Gupta; "Adjacent cell interference in FH-MFSK cellular radio system", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-32**, pp. 191-200, May 1983.
- (87) G. Einarsson; "Coding for a multiple-access frequency-hopping system", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-32**, pp. 589-597, May 1984.
- (88) T. Y. Yan, and C. C. Wang; "Mathematical Models for cochannel interference in FH/MFSK multiple access systems", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-32**, pp. 670-678, June 1984.
- (89) G. L. Turin; "The effects of multipath and fading on the performance of direct-sequence CDMA systems", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-33**, pp. 213-219, Aug. 1984.
- (90) J. Y. N. Hui; "Throughput analysis for code division multiple accessing of the spread spectrum channel", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-33**, pp. 98-102, Aug. 1984.
- (91) G. Niyonizeye, M. Lecours, and T. H. Huynh; "Mutual interferences in a binary FH-FSK spread spectrum system for mobile Radio", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-34**, pp. 28-34, Feb. 1985.
- (92) R. Viswanathan and S. C. Gupta; "Nonparametric Receiver for FH-MFSK mobile radio", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-33**, pp. 178-184, Feb. 1985.
- (93) A. W. Lam and D. V. Sarwate; "Multiple-user interference in FHMA-DPSK spread-spectrum communications", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-34**, pp. 1-12, Jan. 1986.
- (94) J. S. Bird and B. Felstead; "Antijam performance of fast-frequency-hopped M-ary NCFSK-an overview", *IEEE Journal on SAC*, **SAC-4**, 2, pp. 216-223, Mar. 1986.
5. 広帯域陸上移動伝搬
- (95) 吉田 進, 中嶋信生; "アンテナと電波伝搬", *信学誌*, **68**, 11, pp. 1232-1238, 1985. 11.
- (96) G. L. Turin, F. D. Clapp, T. L. Johnston, S. B. Fine, and D. Lavry; "A statistical model of urban multipath propagation", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-21**, pp. 1-9, Feb. 1972.
- (97) D. C. Cox; "Delay Doppler characteristics of multipath propagation at 910 MHz in a suburban mobile radio environment", *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, **AP-20**, pp. 625-635, Sept. 1972.
- (98) D. C. Cox and R. P. Leck; "Correlation Bandwidth and delay spread multipath propagation statistics for 910 MHz urban mobile radio channels", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-23**, pp. 1271-1280, Nov. 1975.
- (99) H. Suzuki; "A Statistical Model for Urban Radio Propagation", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-25**, 7, pp. 673-680, July 1977.
- (100) D. L. Nielson; "Microwave Propagation Measurement for Mobile Digital Radio Application", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-27**, pp. 117-132, Aug. 1978.

- (101) F. Ikegami, and S. Yoshida; "Analysis of multipath propagation structure in urban mobile radio environments", *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, **AP-28**, 4, pp. 531-537, July 1980.
- (102) 大森, 大黒, 山田, 薄井; "920 MHz 帯におけるスプレッドスペクトラム方式を利用したマルチパス測定装置の現場試験結果", *信学技報*, **AP80-124**, 1981. 2.
- (103) P. F. Sass; "Propagation measurement for UHF spread spectrum mobile communications", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-32**, pp. 168-176, May 1983.
- (104) F. Ikegami, S. Yoshida, T. Takeuchi, and M. Umehira; "Propagation factors controlling mean field strength on urban streets", *IEEE Trans. Antennas & Propag.*, **AP-32**, 8, pp. 822-829, Aug. 1984.
- (105) A. S. Bajwa and J. D. Parsons; "Large area characteristics of urban UHF multipath propagation and its relevance to the performance bounds of mobile radio systems", *Proc. IEE*, **132**, Pt. F, 2, Apr. 1985.
- (106) A. S. Bajwa; "UHF wideband statistical model and simulation of mobile radio multipath propagation effects", *Proc. IEE*, **132**, Pt. F, 5, pp. 327-333, Aug. 1985.
- (107) 井家上哲史, 水野光彦; "スペクトル拡散信号を用いた陸上移動伝搬特性の測定", 昭和60年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 分冊3, S5-11, 1985. 3.
- (108) E. C. Caples, K. E. Massad, T. R. Minor; "A UHF Channel Simulator for Digital Mobile Radio", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, **VT-29**, pp. 281-298, May 1980.
- (109) 水野光彦, 角川靖夫; "陸上移動用広帯域フェージングシミュレータ", *信学技報*, **AP82-3**, 1982. 4.
- (110) H. W. Arnold, W. F. Bodtmann; "A hybrid multichannel hardware simulator for frequency-selective mobile radio paths", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-31**, pp. 370-377, March 1983.
6. 陸上移動通信一般
- (111) W. C. Jakes; "Microwave Mobile communications", Wiley, New York, 1974.
- (112) W. C. Y. Lee; "Mobile Communications Engineering", McGraw-Hill, New York, 1982, Chap., 3.
- (113) 平出賢吉, 室田和昭; "移動通信におけるデジタル伝送技術", *信学誌*, **65**, 2, pp. 192-198, 1982. 2.
- (114) 森永規彦, 竹克讓; "陸上移動通信の研究動向", *信学誌*, **68**, 8, pp. 906-910, 1985. 8.
- (115) 横山光雄; "移動通信用狭帯域変復調技術の系譜", *信学誌*, **68**, 10, pp. 1121-1129, 1985. 10.
- (116) 移動通信特集, *信学誌*, **68**, 11, 1985. 11.
- (117) Y. Okumura and M. Shinji (editors); "Mobile Radio Communications", *IEEE Communications Magazine*, **24**, 2, Feb. 1986.
- (118) 堀越 淳; "高速デジタル伝送", *信学誌*, **68**, 11, pp. 1210-1214, 1985. 11.
- (119) K. Kinoshita, M. Hata, and K. Hirade; "Digital mobile telephone using TD/FDMA scheme", *IEEE trans. Vehicular Technol.*, **VT-31**, 4, pp. 153-157, Nov. 1982.
- (120) 高井, 吉田, 池上, 竹内; "多重波伝搬による瞬時符号誤りとビット同期系に基づく誤り発生機構の分析", *信学技報*, **CS83-158**, 1984. 1.
- (121) 森永, 宮垣, 滑川; "最適受信機 (IV)", *信学誌*, **67**, 8, pp. 875-880, 1984. 8.
7. パケット無線通信解説
- (122) R. E. Kahn et al.; "Advances in packet radio technology", *Proc. IEEE*, **66**, pp. 1468-1496, Nov. 1978.
- (123) F. A. Tobagi, R. Binder and B. Leiner; "Packet radio and satellite networks", *IEEE Communications Magazine*, **22**, 11, pp. 24-40, Nov. 1984.
- (124) R. Sinha and S. C. Gupta; "Mobile packet radio networks: state-of-the-art", *IEEE Communications Magazine*, **23**, 3, pp. 53-61, Mar. 1985.
- (125) 福田 明; "パケット移動通信", *信学誌*, **68**, 11, pp. 1219-1223, 1985. 11.
- (126) 田坂修二; "LAN, 衛星通信の制御アルゴリズム", *信学誌*, **69**, 4, pp. 344-349, 1986. 4.
8. 構内移動通信
- (127) W. R. Shreve; "Radio data link", *Hewlett-Packard Journal*, p. 7, Jan. 1982.
- (128) K. Yamada, K. Daikoku, and H. Usui; "Performance of portable radio telephone using spread spectrum", *IEEE Trans. Commun.*, **COM-32**, pp. 762-768, July 1984.

- (129) 守山栄松, 柳光広文; “スペクトル拡散方式による室内データ伝送”, 昭和 61 年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 分冊10, 2364, p. 10-77, 1985. 3.
- (130) K. Pahlavan; “Wireless communications of office information networks”, *IEEE Communications Magazine*, 23, 6, pp. 19-27, June 1985.
- (131) M. Kavehrad; “Performance of nondiversity receivers for spread-spectrum indoor wireless communications”, *AT & T Technical Journal*, 64, 6, pp. 1181-1205, July-August 1985.
- (132) 岡坂, 海野, 吉田, 大泉, 牧野; “F & F 自動倉庫システム”, 日立評論, 67, 9, pp. 37-42, 1985. 9.
- (133) 大井哲雄, 田中慶次; “構内移動通信”, 信学誌, 68, 11, pp. 1195-1200, 1985. 11.
- (134) 杉浦 行, 石原秀昭; “微弱電波機器の展望”, 信学誌, 69, 3, pp. 231-233, 1986. 3.
9. デバイス
- (135) 山之内和彦; “SAW の信号処理分野への応用”, 信学誌, 65, 12, pp. 1267-1273, 1982. 12.
- (136) S. Minagawa, T. Okamoto, T. Niitsuma, K. Tsubouchi, and N. Mikoshima; “Efficient ZnO-SiO₂-Si Sezawa wave convolver”, *IEEE Trans. Sonics Ultrason.*, SU-32, 5, pp. 670-673, Sept. 1985.
- (137) N. Sato, K. Kobayashi, and N. Hamamoto; “Acquisition performance of CCD matched filter for PN spread spectrum signal”, *Proc. GLOBCOM '83*, pp. 1315-1319, Dec. 1983.
10. SS 方式一般 (宇宙, 有線, その他への応用)
- (138) L. Carrier and W.S. Pope; “An overview of the space shuttle orbiter communication and tracking system”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-26, 11, pp. 1494-1506, Nov. 1978.
- (139) S. W. Golomb (editor); *Digital communications with space applications*, chap. 5, 6, Prentice-Hall, 1964.
- (140) 広崎膨太郎; “スペクトラム拡散通信の応用について”, 電学誌, 105, 1, pp. 45-48, 1985. 1.
- (141) P. K. Van der Gracht and R. W. Donaldson; “Communications using pseudonoise modulation on electric power distribution circuits”, *IEEE Trans. Commun.*, COM-33, 9, pp. 964-974, Sept. 1985.
- (142) B. W. Parkinson and S. W. Gilbert; “NAVSTAR: global positioning system-ten years later”, *Proc. IEEE*, 71, 10, pp. 1177-1179, Oct. 1983.
- (143) 浦塚 誠, 今江理人, 他; “CS-2 衛星によるスペクトル拡散時刻比較実験”, 昭和 61 年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 分冊 7, 2625, 1986. 3.
- (144) 笹岡, 浜本, 西垣, 西山, 吉本; “通信衛星 (CS) を用いたスペクトラム 拡散多元接続通信実験結果”, 電波季, 30, 155, pp. 115-130, June 1984.
- (145) P. R. Drouilhet, Jr.; “TATS-A Bandsread Modulation-Demodulation Systems for Multiple Access Tactical Satellite Communication”, *IEEE Electron. Aerosp. Syst. Conv. Rec.*, pp. 126-132, Oct. 27-29, 1969.
- (146) 鈴木, 大内, 石川, 水野, 猿渡; “TV バンドによるスペクトル拡散放送の構想”, 昭和 61 年度電子通信学会総合全国大会予稿集, 分冊 9, 2006, 1986. 3.
- (147) 河野, 羽鳥, 今井; “非同期 SSMA における他局間干渉の除去方式について”, 信学技報, CS82-38, 1982.
- (148) 笠原正雄; “符号理論の新しい展開”, 数理科学, No. 210, pp. 5-10, Dec. 1980.
- (149) 坂井利之; “遺伝子工学と情報理論の接点”, 信学誌, 66, 5, pp. 439-443, 1983. 5.

