

大容量移動通信方式における周波数 有効利用技術*

坂 本 正 行
秦 正 治
藤 井 輝 也

あらまし NTT では、加入者容量の大幅な増大およびサービス性の充実に目標として 800 MHz 帯大容量移動通信方式の実用化を進めている。本論文は、大容量移動通信方式における周波数有効利用技術について述べたものである。

周波数軸上のチャンネル数 および 空間的再利用を総合した 周波数利用率を最大にする 最適 チャンネル 間隔は 12.5 kHz であることを明らかにした。

次に、ダイバーシチ受信による干渉耐力の向上と空間的再利用率の改善効果を定量的に明らかにした。通話中に干渉が増大した場合にこれを検出して、干渉量の少ない同一ゾーン内他チャンネルに切り換えることにより干渉を軽減できることを示し、切り換えによる干渉軽減効果を計算機シミュレーションにより求めた。また、オフエア呼設定とフレキシブルチャンネル割当てによる時間的利用率向上効果について述べた。

1 ま え が き

無線を使うすべての方式にとって、周波数の有効利用は等しく重要な課題である。特に、経済性や移動機の装置構成等の制約から、使用できる周波数帯が UHF 帯以下に限られている移動通信では、国民の共有財産とも言えるべき周波数をいかに有効に利用するかが最大の課題である。

周波数有効利用の第一は使用周波数帯の拡大である。昭和 30 年代後半に 400 MHz 帯の導入、昭和 54 年に 800 MHz 帯自動車電話方式の導入がなされ⁽¹⁾、さらに、最近では準マイクロ波帯の移動通信への

適用が検討されている⁽²⁾。

第二の方法は無線チャンネル間隔の狭帯域化である。これについても 400 MHz 帯の 50 kHz から 25 kHz への狭帯域化が昭和 40 年代前半に、さらに 12.5 kHz 化が昭和 50 年代後半に実用されている⁽¹⁾。

第三の方法であり自動車電話に代表される小ゾーン構成法は、無線ゾーンの大きさをアンテナや無線機の性能限界から決まる値よりもむしろ小さくして、空間的に周波数を高密度で再利用するものである。

周波数有効利用の最後の方法は時間的利用率の向上である。自動車電話などでは複数の無線チャネルを複数の移動機で共用する、いわゆるマルチチャネルアクセス方式により時間的利用率の向上が図られている。

大容量移動通信方式は、現行方式と同じ 800 MHz 帯を用いて、加入者容量の大幅な増大および移動機の小形化等によるサービスの充実に目的として研究所で実用化中の新方式である⁽³⁾⁽⁴⁾。本論文では、大容量移動通信方式について上述の第二、第三、および第四の方法である周波数軸上、空間上、および時間軸上の有

* Efficient Frequency Utilization Techniques for High-Capacity Land Mobile Communication System. By Masayuki SAKAMOTO, Masaharu HATA and Teruya Fujii.
この研究は移動通信方式研究室で行われたものである。

© 日本電信電話株式会社研究開発本部 1986

効利用技術を述べたものである。

2 周波数利用率

2.1 周波数軸上および時間軸上の利用率

一般に周波数有効利用の度合を表す周波数利用率は、前述のように周波数軸、空間および時間の3つの面での利用率 η_f , η_s , η_t に分類できる⁽⁵⁾。

これらのうち周波数軸上の利用率 η_f は、与えられた帯域幅から切り出せるチャンネル数に等しく、帯域幅を1に正規化すれば η_f は次式のようにチャンネル間隔 f_{sp} の逆数になる。

$$\eta_f = 1/f_{sp} \quad (1)$$

チャンネル間隔を狭くするほど η_s は大きくなるが、周波数偏移が減少するため後述する空間的利用率は逆に低下する。

一方、時間軸上の利用率 η_t は、マルチチャンネルアクセスによるチャンネル効率向上効果と、オフエア呼設定⁽⁶⁾等による向上効果との積で表される。マルチチャンネルアクセスによる効果とは、無線ゾーン当たりのチャンネル数増大によるいわゆる大群化効果である。オフエア呼設定とは、移動発呼において、ダイヤル中や固定網内接続中、呼出中など通話に供していない時間は可能な限り無線チャンネルを割り当てないようにするものである。無線チャンネルを割り当てないこととした時間の割合が利用率向上に相当する。

2.2 空間的利用率

レイリーフェージングが存在するもとで通話品質を規定値以内に保つために必要な希望波対干渉波比平均値の所要値を A とし、ゾーン周辺で希望波対干渉波比平均値を一定の場所的劣化率以内で確保するためのシャドウフェージングに対するマージンを M としたとき、繰り返しゾーン数 N は次の式で表される⁽⁷⁾。

$$N = \{1 + (MA)^{1/\alpha}\}^2/3 \quad (2)$$

ただし、 α は、 r を送受信点間距離としたとき、受信

電力の距離特性を $K \cdot r^{-\alpha}$ で近似したときの α であり、陸上移動通信では3～4の値となる⁽⁸⁾。 MA はゾーン周辺における希望波対干渉波比の平均値に相当する。なお、完全に規則的な置局の場合には、 N は3, 4, 7, 9, 12, 13といった離散的な数値をとり⁽⁹⁾、次章以下で述べる各種改善効果も段階的である。しかし、現実には完全に規則的な置局は困難であり、したがって、等価的な N の値は上述の数値以外の値も取り得る。このためここでは式(2)の N をそのまま用いることとする。

一方、自動車電話トラフィックの地理的分布は一般に都心部が高く周辺部に行くに従って低くなる傾向にある。都心からの距離を $d(\text{km})$ としたとき、トラフィックの密度分布はほぼ $10^{-d/k}$ で近似できる。東京の場合 k は20 km 前後の値である⁽³⁾。全平面のトラフィックを1に規格化した確率密度関数を $p(r)$ とすると

$$p(r) = 1/2\pi \cdot (\ln 10/k)^2 \cdot 10^{-r/k} \quad (3)$$

となる。

空間的利用率 η_s は図1に示す中心部の繰り返し単位の中のトラフィック量の逆数に比例する。簡単のために、中心部繰り返し単位内のトラフィックを、これと等価な面積を持つ円内のトラフィックで近似することとする。ゾーン半径を R としたとき繰り返し単位内 N ゾーンの面積は $3\sqrt{3}/2 \cdot NR^2$ であるから、等価半径 R_0 は

$$R_0 = \sqrt{3\sqrt{3}/(2\pi)} \cdot \sqrt{NR} \quad (4)$$

となる。したがって、 η_s は $p(r)$ を半径 R_0 内で積分することにより

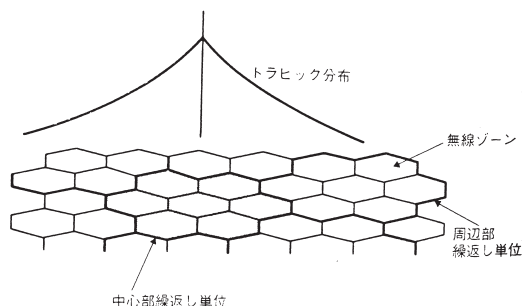


図1 トラフィック分布と周波数繰返し単位 (7ゾーン繰返しの例)

$$\eta_s = \{1 - (\ln 10/k \cdot R_0 + 1) \cdot 10^{-R_0/k}\}^{-1} \quad (5)$$

で表される⁽⁷⁾。なお、トラフィック分布が一様の場合には、中心部繰り返し単位内のトラフィックはその面積に比例するから、 η_s は繰り返し単位の面積すなわち NR^2 の逆数に比例する。

η_s を大きくするには式(2)、式(4)および式(5)から明らかなようにゾーン半径 R 、または希望波対干渉波の所要値 MA を小さくする必要がある。これらのうち技術的には耐干渉特性の改善による MA の減少が重要な課題である。ゾーン半径については、現行方式に関して従来の 5 km 半径から 3 km 半径への縮小がすでに行われている。

3 チャンネル間隔の狭小化

チャンネル間隔を狭小化した場合、周波数的利用率はチャンネル間隔の逆数に比例して向上する。しかし、周波数偏移が下がる結果、耐干渉特性が劣化し空間的利用率は低下する。図2は最大周波数偏移をパラメータに、レイリーフェージングが存在するもとの希望波対干渉波の平均値と復調後の信号対干渉電力比の理論

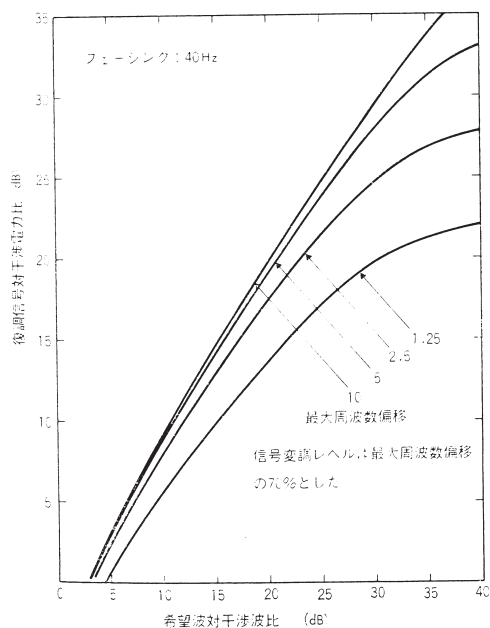


図2 復調信号対干渉電力比特性

値⁽¹⁰⁾を示したものである。これをもとに、信号対干渉電力比の所要値を 14 dB、シャドウフェージングに対するマージン $M=10$ (10 dB)、ゾーン半径 3 km、 $k=20$ km、 $\alpha=3.5$ の場合について、最大周波数偏移と周波数的利用率 $\eta_f \times$ 空間的利用率 η_s の関係を図3に示した。ただし、チャンネル間隔については、カーソンの法則がそのまま成り立つとし最高信号周波数 (3 kHz) と最大周波数偏移の和の2倍に等しいと仮定した。同図から明らかなように、利用率を最大にする最適な最大周波数偏移は 2 kHz 付近である。

現実のシステムにおけるチャンネル間隔は、隣接チャンネル干渉に対する保護のためカーソンの法則で決まる値よりも若干大きくする必要があるほか、従来のチャンネル割り当てとの整合性の点から 800 MHz 帯では 25 kHz の整数倍または整数分の1にする必要がある。

大容量移動通信方式では以上の点を考慮して 12.5 kHz への狭帯域化を実現する。最大周波数偏移および周波数安定度 (移動機) は、25 kHz 間隔の現行方式の 1/2 の値である 2.5 kHz および 1.5×10^{-6} とする。

ここで改めて 25 kHz チャンネル間隔システムと比較して、12.5 kHz 狭帯域化による周波数利用率向上効果を明らかにしておく。信号対干渉電力比の所要値を 14 dB としたとき、最大周波数偏移が 5 kHz である 25

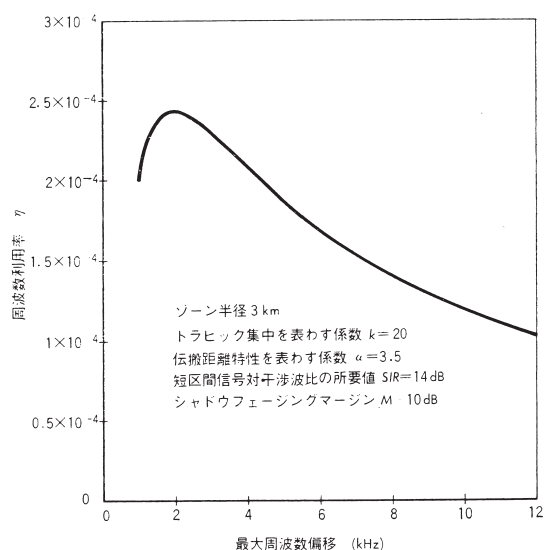


図3 最大周波数偏移と周波数利用率

kHz システムでは、図 2 より希望波対干渉波の所要値 A は 32 (約 15 dB) である。 $M=10$ (10 dB) とすると 25 kHz 方式の周波数 および 空間利用率 η_{f0} , η_{s0} は 式 (1), 式 (2), 式 (4), 式 (5) より

$$\eta_{f0} \cdot \eta_{s0} = 1.30 \times 10^{-4} \quad (\text{チャンネル/Hz/エリア}) \quad (6)$$

となる。一方、図 2 から狭帯域化した場合の A は 3 dB 劣化して 64 (18 dB) となるから利用率 η_{f1} , η_{s1} は

$$\eta_{f1} \cdot \eta_{s1} = 2.09 \times 10^{-4} \quad (\text{チャンネル/Hz/エリア}) \quad (7)$$

となる。したがって、狭帯域化のみによる 周波数利用率 の向上は 1.61 倍である。

4 干渉耐力の向上

4.1 ダイバーシチ受信

独立または独立に近い 2 つの受信ブランチの信号を合成して受信するダイバーシチ受信では、受信レベル特性が大幅に改善されるとともに、干渉特性も改善することができる。この理由は図 4 に示すように、希望波対干渉波の

平均値 (CIR) が 1 より大きい通常の場合には、干渉劣化の大部分は希望波の瞬時レベルが低下したときに生じるのに対して、ダイバーシチでは希望波の瞬時レベル低下確率そのものを小さくする効果があるためである。

ダイバーシチ受信の信号合成法は種々の方式が考えられているが、大容量移動通信方式では回路構成の簡易さ、改善効果等の点から検波後切替ダイバーシチを採用する。これはアンテナから検波器までの受信系列を 2 系統設け、瞬時受信レベルの高い方の復調信号を選択して切り換えるものである。チャンネル間隔 12.5 kHz の受信機のダイバーシチ効果を図 5 に示す⁽¹¹⁾。ブランチ間相関を 0.5 程度見込んでも、復調後の SIR 所要値 14 dB を確保するために必要な CIR 所要値をダイバーシチにより約 5 dB 低減させることが可能である。12.5 kHz に狭帯域化したシステムにダイバーシチを適用した場合の周波数利用率 η_{f2} , η_{s2} は MA が 200 (23 dB) であるから

$$\eta_{f2} \cdot \eta_{s2} = 3.01 \times 10^{-4} \quad (\text{チャンネル/Hz/エリア}) \quad (8)$$

となり、狭帯域化とダイバーシチ受信を併用すれば、狭帯域化のみの場合よりさらに 1.44 倍利用率が向上することがわかる。

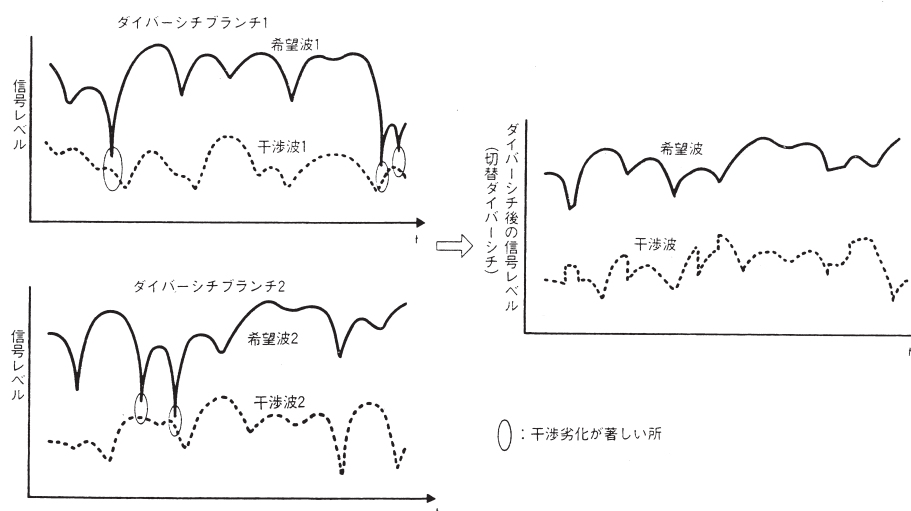


図 4 ダイバーシチによる希望波対干渉波比の改善

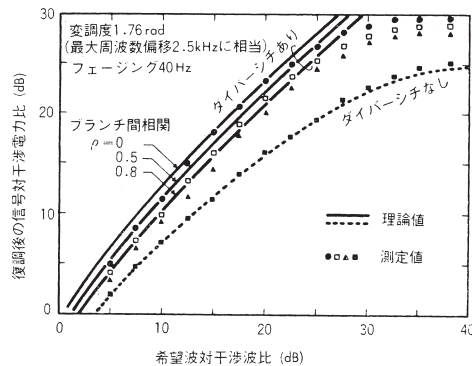


図 5 ダイバシティ効果

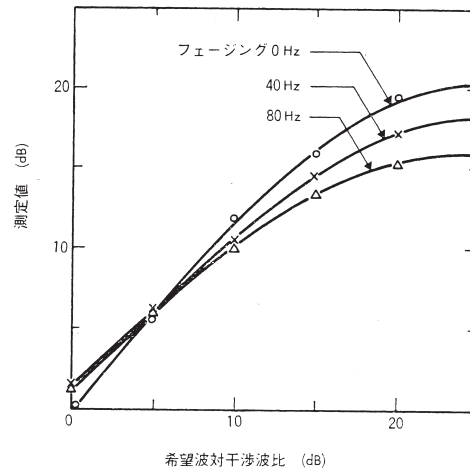


図 6 希望波対干渉波比の測定結果

4.2 干渉検出・チャネル切換

(1) 同一チャネル干渉量の測定

同一周波数を繰り返して使用する限り、ある程度の同一チャネル干渉が生じることは避け得ないことである。しかし、通話中に同一チャネル干渉の量を検出し、これが一定値以上であれば干渉の少ない同一ゾーン内他チャネルに切り換えることができれば、干渉劣化の確率を軽減することが可能となる。逆に一定値の干渉劣化確率を許容すれば、地理的繰り返し距離を短縮することができる。

干渉検出・チャネル切換のためには、同一チャネル干渉量の正確な測定技術が鍵となる。大容量移動通信方式では、次に示すように、新たに考案した干渉量測定法によりこれを実現している⁽¹²⁾⁽¹³⁾。

同一チャネル干渉を受けた受信信号は一般に次のように表される。

$$e(t) = \{E_s^2 + E_i^2 + 2E_s E_i \cos \Psi\}^{1/2} \cdot \sin[\omega_c t + S_s + \tan^{-1}\{E_s \sin \Psi / (E_i + E_s \cos \Psi)\}] \quad (9)$$

ただし、 E_s 、 E_i 、 S_s はそれぞれ希望波、干渉波の包絡線、希望波の角度変調成分を表す。また Ψ は式(10)で示される。以上の信号等は、時間の関数であるが式(9)および式(10)ではその標記を省略してある。

$$\Psi = \delta\omega_c t + \phi + S_i - S_s \quad (10)$$

$\delta\omega_c$ は搬送波周波数差、 ϕ は位相差、 S_i は妨害波の角度変調成分である。

式(9)の包絡線成分の二乗値のうち、 $E_s^2 + E_i^2$ は 800 MHz 帯陸上移動無線では数十 Hz 以下のフェーシングで変動しているが、 $\cos \Psi$ は変調信号の周波数偏移量、すなわち kHz のオーダーで変動しているビート成分である。式(9)の包絡線成分を $R(t)$ としたとき、 $R^2(t)$ を Δt の間隔で 2 回 サンプリングし、次の平均値を求める。

$$X = \langle R^2(t) \rangle \quad (11)$$

$$Y = \langle \{(R^2(t) - R^2(t + \Delta t))\}^2 \rangle \quad (12)$$

$1/\Delta t$ をフェーシング速度よりは速く、かつ、 $\cos \Psi$ の変動速度よりは遅い値に選ぶと、 $E(t) \doteq E(t + \Delta t)$ 、 $\langle \cos \Psi(t) \cdot \cos \Psi(t + \Delta t) \rangle \doteq 0$ で近似できるから、

$$X \doteq \langle E_s^2 \rangle + \langle E_i^2 \rangle \quad (13)$$

$$Y \doteq 4 \langle E_s^2 \rangle \cdot \langle E_i^2 \rangle \quad (14)$$

となり、これを用いて CIR 、 Γ は次の式から求まる。

$$\Gamma = \langle E_s^2 \rangle / \langle E_i^2 \rangle = K + \sqrt{K^2 - 1} \quad (15)$$

ただし、

$$K = 2X^2 / Y - 1 \quad (16)$$

式(11)から式(14)までの演算を含めて、干渉量検出回路は A/D 変換器付きの 1 チップ CPU だけで実現可能である⁽¹⁴⁾。測定結果を図 6 に示す。

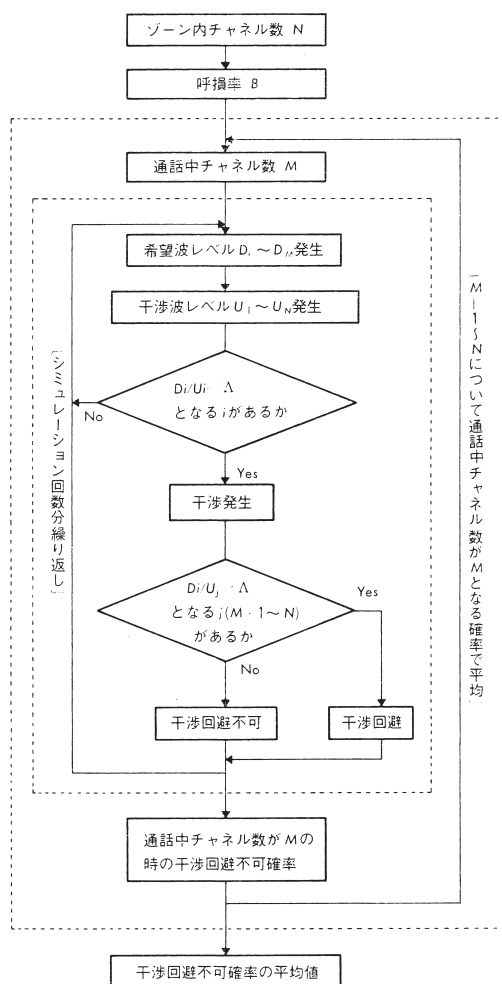


図 7 干渉検出・チャネル切換効果のシミュレーション

(2) 干渉軽減効果

通話中の呼を同一ゾーン内他 ネッセルに切り換えた場合、希望波レベルは切換の前後で変わらないが、干渉波レベルは当然変わってくる。干渉検出・チャネル切換は、通話中に希望波対干渉波比が劣化した場合、同一ゾーン内の通話中でない 空きチャネルのなかから 干渉波レベルが低く希望波対干渉波比が 所要値を満足するチャネルを選択し、このチャネルに 切り換えることにより干渉を回避するものである。希望波対干渉波比が 規定値以上となる空きチャネルがない場合には干渉を回避することはできない。

干渉検出・チャネル切換による干渉軽減効果を計算

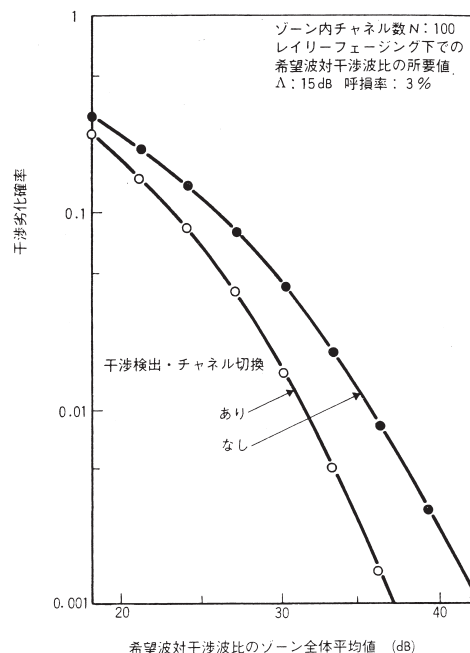


図 8 干渉検出・チャネル切換による干渉軽減

機シミュレーションによって求めた結果⁽¹⁵⁾を次に述べる。シミュレーション等の方法は図 7 に示すとおりである。ゾーン内で通話中であるチャネル数 M を仮定し、このときの干渉回避不能確率をシミュレーションにより求める。次に、ゾーン内チャネル数 N と呼損率 B とから、通話中チャネル数が M である 確率⁽¹⁶⁾を求め、 $M=1 \sim N$ についてシミュレーションを繰り返して干渉回避不能確率を求める。この値が、干渉検出・チャネル切換によっても回避できない干渉劣化確率である。

その結果を図 8 に示す。呼損率 3 % で干渉劣化確率 10 % 程度では希望波対干渉波のゾーン全体平均値を約 3 dB 低減することが可能である。すなわち、干渉波ゾーンを 3 dB 相当分だけ近づけることができる。

狭帯域化、ダイバーシチを適用したシステムにさらに干渉検出・チャネル切換を適用した場合の周波数利用率 $\eta_{fs} \cdot \eta_{ss}$ は $MA=100$ (20 dB) であるから

$$\eta_{fs} \cdot \eta_{ss} = 3.78 \times 10^{-4} \quad (\text{チャネル/Hz/エリア}) \quad (17)$$

となり、利用率向上効果は 1.26 倍である。

4.3 送信電力制御

地理的再利用を極限まで高めたシステムにおいては、高速道路上や高層ビルで希望波局、干渉波局ともに見通しまたはこれに近い状態になる場合がある。この場合は干渉局に対して極めて高い干渉量を与えることになる。これまでに述べた技術は平均的な伝搬特性、使用モード等の場合に対して有効であるが、このような特殊な条件での干渉量を軽減できるものではない。

大容量移動通信方式では適応送信電力制御を採用することにより、このような使用に対しても干渉量を十分軽減することが可能である。適応送信電力制御とは、受信側での平均受信レベル情報を送信側に送り返す等により必要最小限の送信電力となるよう制御するものである。これにより、停止して使用することが多く、したがって、空間定在波中での停止位置によって受信レベルが無相関に変化する携帯機に対しても有効な制御を可能としている。

送信電力制御はまた平均的な伝搬特性、使用モードの場合にも干渉を軽減することができる。図9はその効果を示したものであり、ゾーン全体の希望波対干渉波比の所要値を1～2 dB 軽減することが可能である⁽¹⁷⁾。

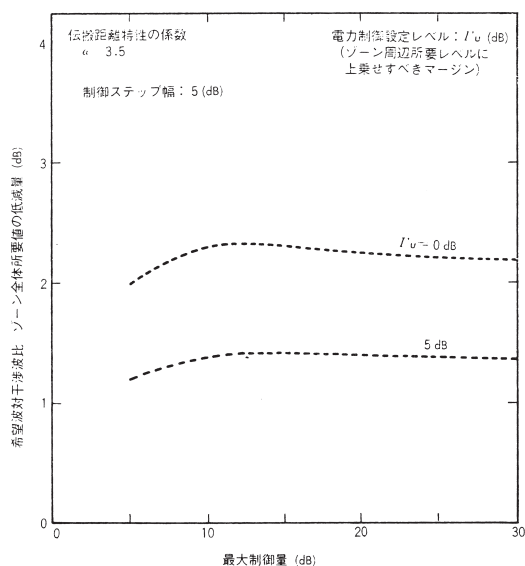


図9 送信電力制御による希望波対干渉波比所要値の低減

5 時間的利用率の向上

5.1 オフエア呼設定

前述のようにオフエア呼設定とは、実際に通話に使用されるまでの無線チャンネル割り当てをできるだけなくするものである。移動加入者 オフフックから着側被呼加入者応答までのどのタイミングで割り当てられるかによって、その効果は変わってくる。しかし、固定網側の通話路を設定し着加入者に対する呼出しを開始したあとで無線チャンネルを設定する場合には、被呼者が呼び出されて応答したあと、無線チャンネル設定完了まで通話の開始が待たされるほか、最悪の場合には無線チャンネルビジーのため無線チャンネルの割り当てができない場合がある⁽¹⁸⁾⁽¹⁹⁾。これは、被呼者に対するサービス性を著しく損なうものであり、慎重な検討を要する。

移動加入者のダイヤル信号を制御チャンネルで伝送し、基地側でダイヤル信号の受信を完了してから無線チャンネルを割り当てる方法はオフエアの効果最もありが上述の問題点はない。この場合、現行方式の平均通話時分100秒⁽²⁰⁾に対して、平均ダイヤル時間が約8秒⁽²¹⁾であるから、オフエア呼設定による時間的利用率は1.08倍になる。なお、ダイヤル信号は、移動機内でメモリした後2400 b/sの制御チャンネル高速信号で一括して伝送するため、ダイヤル信号伝送中の制御チャンネル占有時間は十分少ない。

5.2 フレキシブルチャンネル配置

フレキシブルチャンネル配置⁽²²⁾は、各ゾーンのトラヒックピークの時間帯が必ずしも一致しないことに着目して一部の周波数をゾーン間で時間的に融通使用するものである。複数のゾーンに共通に使用できる周波数を設けておき、トラヒックがピークになっているゾーンに優先的にこれを割り当て、周辺ゾーンではこの周波数を使用しないように制御する。最適アルゴリズムおよび周波数利用率向上効果はトラヒックのゾーン間変動特性によって異なるため、サービス後にトラヒック変動特性を詳細に調査し、最適なアルゴリズムを決める必要がある。

6 む す び

大容量移動通信方式における周波数有効利用技術について、その効果を定量的に明らかにした。時間軸上および空間利用上の最適な周波数利用率を与える最大周波数偏移は2 kHz 付近であり、したがって、我が国のチャンネル割り当て上からは12.5 kHz への狭帯域化が最適であることを示した。

また、狭帯域化、ダイバーシチ受信、干渉検出・チャンネル切り換えおよびオフエア呼設定の各技術について、周波数利用率向上効果を求め、この順に効果が高いことを示した。

謝 辞

本研究の方向づけを与えて頂いた通信網第二研究所電波システム研究部進士部長、倉本主席研究員、渡辺室長に感謝します。また、本論文で用いたダイバーシチ受信、干渉検出等の個々の技術成果は、服部室長、堀川、稲葉各主幹研究員、小園主任研究員等の研究によるものです。これらの方々に感謝します。

文 献

- (1) 神崎：移動通信のための周波数利用の現状と将来動向，信学誌，**68**，No. 11，pp. 1251～1253，1985.
- (2) 宮川・穴戸：電波利用の長期展望，信学誌，**67**，No. 12，pp. 1298～1303，1984.
- (3) 倉本：大容量移動通信方式の設計構想，NTT 国際シンポジウム大容量移動通信方式，pp. 27～43，1983.
- (4) M. Kuramoto, K. Hirade and M. Sakamoto : Design Concept of New High-Capacity Land Mobile Communication System, IEEE, ICC '84, pp. 1188～1191, 1984.
- (5) C. Colavito : On the Efficiency of the Radio Frequency Spectrum Utilization in Fixed and Mobile Communication Systems, Alta Frequenza, XL **111**, No. 9, pp. 640～651, 1974.
- (6) R. H. Tridgell : Proposals for Increasing the User Capacity of the British Post Office Public Radiophone System, IEEE, VTC' 77, pp. 120～128, 1977.

- (7) 秦・坂本：移動通信における変調度とスペクトル利用率，信学技報，CS 85-114，pp. 63～68，1985.
- (8) Hata : Empirical Formula for Propagation Loss in Land Mobile Radio Services, IEEE Trans., VT-**29**, No. 3, pp. 317～325, 1980.
- (9) 桑原監修：自動車電話，p. 75，1985，信学会.
- (10) 諏訪・服部：陸上移動通信における選択ダイバーシチの検討—ベースバンド SIR の同一チャンネル干渉改善効果—，信学論(B)，J **68**-B, No. 2, pp. 228～235，1983.
- (11) 服部：大容量移動通信の主要技術，音声・信号伝送，NTT 国際シンポジウム大容量移動通信方式，pp. 44～63，1983.
- (12) 小園・坂本：移動通信における同一チャンネル干渉量の測定，信学論(B)，J **68**-B, No. 1, pp. 109～116，1985.
- (13) 小園・中嶋・坂本：移動通信における同一チャンネル干渉量の測定方法，通研実報，**35**，No. 2, pp. 199～207，1986.
- (14) 小園・中嶋：移動通信における同一無線チャンネル干渉量測定回路，信学論(B)，J **68**-B, No. 7, 830～831，1985.
- (15) 坂本・小園：同一チャンネル干渉発生時のチャンネル切替効果の一検討，信学会総合全大，No. 2441，1984.
- (16) 藤木・雁部：通信トラヒック理論，p. 46，1980，丸善.
- (17) 藤井・小園：陸上移動通信における送信電力制御の検討—干渉軽減および消費電力低減効果—，信学技報，CS 85-19，1985.
- (18) 稲葉・今村：移動通信へのオフエア呼設定適用の検討，信学会総合全大，No. 2320，1986.
- (19) 沢田・山本・関口：移動通信交換におけるアフエア・コール・セットアップ方式の検討，信学会総合全大，No. 2321，1986.
- (20) 田中：電電公社における移動通信サービス，NTT 国際シンポジウム大容量移動通信方式，pp. 4～19，1983.
- (21) 大西・片倉・松坂・上原：押しボタンダイヤルにおける加入者習性，通研実報，**17**，No. 11, pp. 2519～2537，1968.
- (22) 田島・今村：移動通信におけるフレキシブルチャンネル割当て法の一考察，信学技報，CS 84-160，1985.

(1986, 5, 30 受付)