

移動通信におけるセル設計システム

移動通信サービスにおいて所定の通信品質を保ちつつ、少ない基地局数で効率良くサービスエリアをカバーするセル設計は非常に重要である。昨今のようにセル半径が小さくなり基地局数が多くなると、セル設計を最適化する作業は非常に複雑となるため、数多くの熟練者が必要となる。そこで、セル設計を大幅に簡易化するセル設計システムを開発したので、その概略について述べる。

ふじい てる や あさくら ひろみつ やまさき まさかつ
藤井 輝也・朝倉 弘光・山崎 正勝

まえがき

近年、自動車・携帯電話などの移動通信に対する需要は大都市を中心に急増している。有限な周波数資源でこの需要に対処するためセルの極小化やセクタ化が積極的に進められており、基地局数は増大の一途を辿っている。このような状況下で移動通信特有の複雑な電波伝搬を考慮して、サービスエリア全体で所要の通信品質を確保するように設計を行う置局

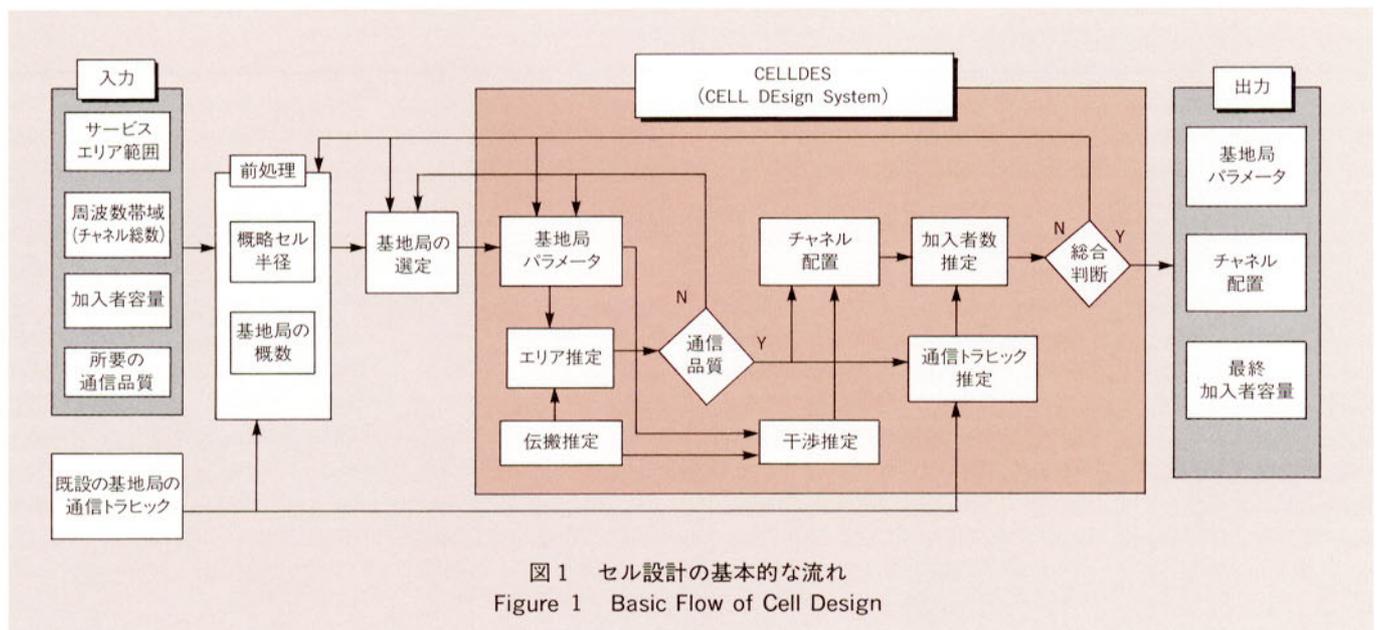
設計（以下、セル設計と呼ぶ）は非常に複雑化している。従来、これらの設計は熟練者の経験に負うところが大きく、基地局数が多くなるにつれて膨大な時間を要するため、その自動化、省力化が強く望まれている。

本稿では、まずセル設計の基本的な考え方について説明し、続いてセル設計を大幅に自動化したセル設計システムCELLDES (CELL DDesign System)^{1,2)}について、その概要を述べる。

セル設計の基本的な考え方

セル設計の基本は、あらかじめサービス範囲を決めたエリア内において提供する通信品質の程度とユーザの収容数（加入者容量）が与えられた場合に、これらを満足するように基地局の配置を決定し、基地局ごとに無線チャンネルを効率よく割り振ることにある。換言すれば、セル設計に求められる主要機能は、

- ① 通信トラフィック量を分析して、所



要の加入者数を満たすために必要な基地局数およびチャンネル数を大まかに算出する機能

上記の結果に基づいて、

- ② 基地局ごとに移動局で受信されるレベルを推定し、サービスエリア内で所定の通信品質（受信レベル）が確保されているか否かを評価するためのエリア推定機能、通信品質評価機能
- ③ 空間的に同一チャンネルおよび隣接チャンネルを再使用するため、これらの干渉を考慮して無線チャンネルを基地局ごとに最適に割り当てるチャンネル配置機能
- ④ 各基地局がカバーしているエリアごとの通信トラヒック量を推定し、基地局ごとのチャンネル数を算出する機能

に大別できる。

ここで、項目①はセル設計を行うための前処理と位置付けることができる。図1にCELLDESによる設計フローの概略を示す。なお、通信品質、所要のチャンネル数および加入者数を入力すれば、サービスエリア内において基地局を自動的に選定し、最適なチャンネル配置を自動的に行うことが理想であるが、選定したビルなどが必ずしも基地局として使用できるとは限らないため、本フローでは基地局

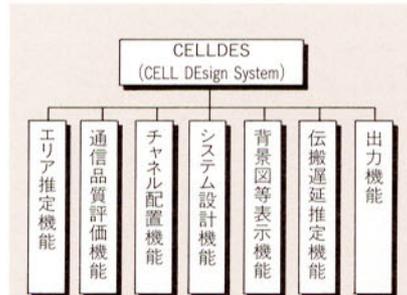


図3 機能構成

Figure 3 Main Functions of CELLDES

の選定はシステム化の対象外としている。まず、CELLDESの基本構成を説明し、続いて、上述した各項目について説明する。

CELLDESの構成

図2にCELLDESのシステム構成を示す。CELLDESは処理の高速化を図るため、主装置にワークステーション(EWS)を、OSにUNIXを、GUIにオープンウィンドウを用いている。周辺装置として、プリンタ、X-Yプロッタ、A0サイズの打出しを可能とする静電プロッタをサポートしている。

CELLDESでは、地形データ、建物高、道路幅などのデータを用いて、受信レベルの推定を行うため、それらのデー

表1 基地局数の概算を決定するパラメータ
Table 1 Main Parameters for Calculating Base Station Number

パラメータ	記号	備考
加入者容量	C	
無線チャンネル総数	F	
セルの繰り返し数	N_c	
トラヒック補正係数	ζ	0.1~0.3
チャンネル使用率係数	η	0.6~0.9
チャンネル当りの加入者数	M	50(0.02erl)
サービスエリア面積	S	
基地局当りの面積	Sc	

タをデータベース(DB)化している。また、推定した結果の背景表示に地図を用いることから、地形図および住宅地図をDB化している。

CELLDESの主要機能を図3に示す。CELLDESは、セル設計業務を支援する多くの機能を備えているが、エリア推定機能、通信品質評価機能およびチャンネル配置機能が基本機能である。

基地局数およびチャンネル数の概算

サービスエリア内で所要の加入者数を満たすことだけに着目すれば、必要な基地局数 Nb' は表1に示すパラメータを用いて次式で表せる。

$$Nb' = \frac{C}{M \times \frac{F}{N_c} \times \eta} \times \frac{1}{\zeta} \quad (1)$$

ここで、 N_c は同一チャンネルの繰り返しセル数で、干渉に対する耐力、セルの構成法などに依存して異なるが、たとえば、RCR標準デジタル移動通信(PDC)方式では4~9となる。チャンネル使用率係数 η は基地局に必要なトラヒック量とその値を基にアーランB式を用いて算出したチャンネル数から決定される値である。厳密には基地局に割り当てられるチャンネル数で異なることから、表1では大まかな値を示している。また、トラヒック補正係数 ζ は通信トラヒックがサービスエリア内

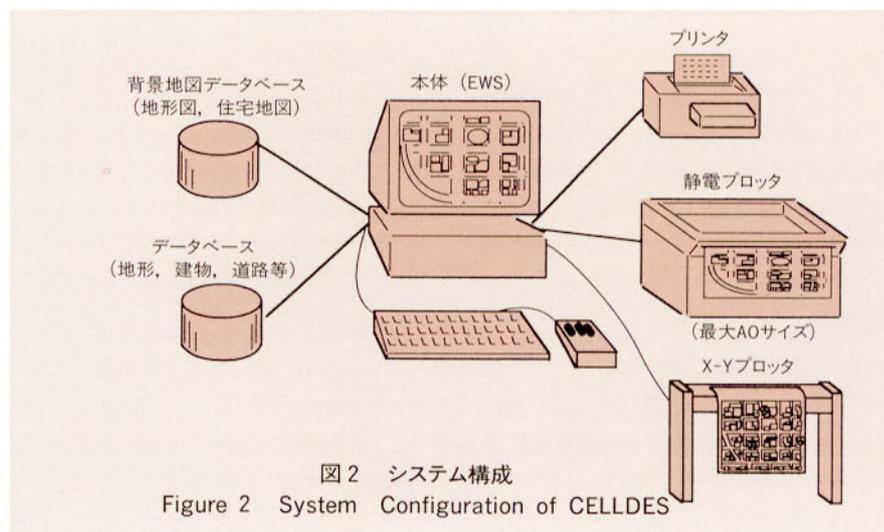


図2 システム構成

Figure 2 System Configuration of CELLDES

で地理的に一様でないことに対して補正を与える係数である。その値は、実際のトラフィック分布により異なるが、トラフィック分布を、たとえば、中心部から周辺部にかけて指数分布で近似できると仮定した場合、表1に示している値で近似できる。

一方、サービスエリアをその中心に基地局がある正六角形セルでカバーする場合を考える。この場合、最大セル半径は送信電力、受信感度などの物理的条件で決まり、その値を r とすれば、1つの基地局でカバーできるセルの面積は $S (= 3\sqrt{3}r^2/2)$ となる。したがって、サービスエリアの面積を S_c と置けば、必要となる基地局数 Nb'' は次式で与えられる。

$$Nb'' = \frac{S_c}{S} \quad (2)$$

すなわち、収容できる加入者数とサービスエリアを同時に考慮した場合、所要となる基地局数 Nb は、式(1)、式(2)を用いて次式で与えられる。

$$Nb = \max(Nb', Nb'') \quad (3)$$

たとえば、 $Nb' < Nb''$ であれば、 $Nb = Nb''$ となり、加入者数だけに着目すれば必要以上の基地局数となる。この場合、仮にすべてのチャネルを使用するとすれば、必要以上の加入者が収容できる。

なお、通信トラフィック分布を仮定した場合における基地局数、セル半径を厳密に求める方法については文献^{3,4)}を参照されたい。

エリアの推定

エリア推定の主要目的は、選定した基地局が所定の通信品質（場所的劣化率、弱電界エリアの特定など）を満たしているか否かを机上で確認することにある。したがって、推定精度が高いほど、実際に基地局を構築した場合の手直し、変更が少なくなる。

CELLDESでは、表2に示す基地局の

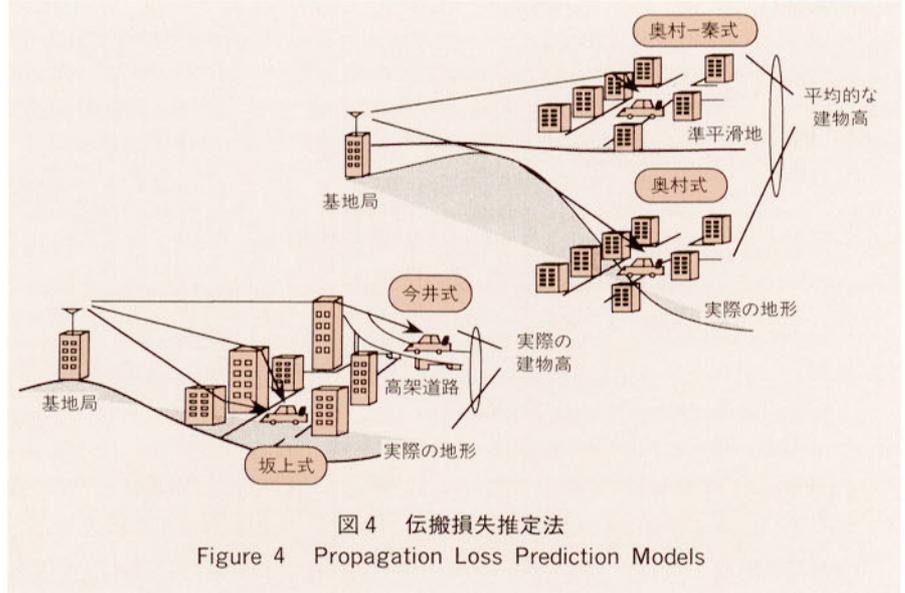


図4 伝搬損失推定法
Figure 4 Propagation Loss Prediction Models

表2 基地局/移動局パラメータ
Table 2 Parameters on BS and MS

パラメータ		備考
基地局	位置（緯度、経度）	
	アンテナ高	
	送信電力	
	フィーダ損失（送受）	
	アンテナ種別	利得 水平面/垂直面内指向特性
移動局	アンテナ高	
	送信電力	
	フィーダ損失（送受）	
	アンテナ種別	利得 水平面/垂直面内指向特性

位置、アンテナ高、送信電力などの基地局パラメータおよび移動局パラメータを設定し、設定した条件において伝搬損失の推定を行いエリアを推定する。この場合、適用する伝搬損失の推定法により推定精度と処理速度は大きく変わる。CELLDESでは図4に示すように、(1)準平滑地域を対象とした推定式として“奥村-秦式”⁵⁾、(2)“奥村-秦式”に対して、地形による損失を補正した“奥村式”⁶⁾、(3)地形および建物高、道路幅などの都市構造物を考慮して、特に都市内における推定精度の向上を図った“坂上式”⁷⁾、(4)“坂上式”を3次元的に拡張して、高架道路などの地表より高い位置での推定を行う“今井式”⁸⁾を備えている。

これらの推定法をその精度で比べると、

(1)、(2)、(3)、(4)の順に向上が図れるが、それに応じて必要とするDB項目も多くなる。CELLDESでは地形データに関しては、国土地理院作成の地形データベースをDB化している。また、建物高、道路幅などのデータに関しては、市販の住宅地図データベースから推定に必要な項目を自動的に取得できるソフトウェアを開発している。

また、処理時間に関しては、複雑な都市構造物データを推定計算のために逐次処理していると、膨大な時間が必要となる。そのため、推定に用いる項目をあらかじめ加工処理（一次処理）してDB化し、そのDBを用いて計算することで処理時間を大幅に短縮している⁹⁾。

図5に、推定式として“坂上式”を用い、新日鉱ビル（虎の門）の屋上に基地局を設置したと仮定して、周辺での受信レベルを一辺が50m四方ごとの平均値として推定した場合の例を示す。準平滑地域を対象とした“奥村-秦式”を用いた推定では不可能であった建物の影響による弱電界地域の特定が可能となっている。これにより、基地局選定を判断するための評価精度を高めることができることから、基地局の誤選定を未然に防ぐことが可能になる。

なお、地形が大きく受信レベルに影響

する場合の評価を容易にするため、図6に示すように地形の上に3次元表示することも可能である。

通信品質の評価

セル設計の段階で必要な通信品質の評価項目は、受信レベルの低下に伴う熱雑音と同一チャネルの繰り返しに伴う干渉雑音である。セルラ移動通信では、受信レベルに応じて移動局が待ち受けしている、または通信している基地局を変更するため、各基地局が守備範囲とするエリア（以下、勢力エリアと呼ぶ）を明確にして、通信品質の評価を行う必要がある。その勢力エリアは、移動通信方式に応じて異なるため注意を要する。すなわち、受信レベルを常時監視しておいて最も受信レベルが高い基地局を選択する方式（たとえば、大容量移動通信方式、PDC方式）と、受信レベルが低下した場合に初めて受信レベルが最も高い基地局を選択する方式（たとえば、大都市、中小都市自動車電話方式）とでは、その勢力エリアは異なってくる。CELLDESでは、両方式をサポートしている。

一例として、最も受信レベルが高い基

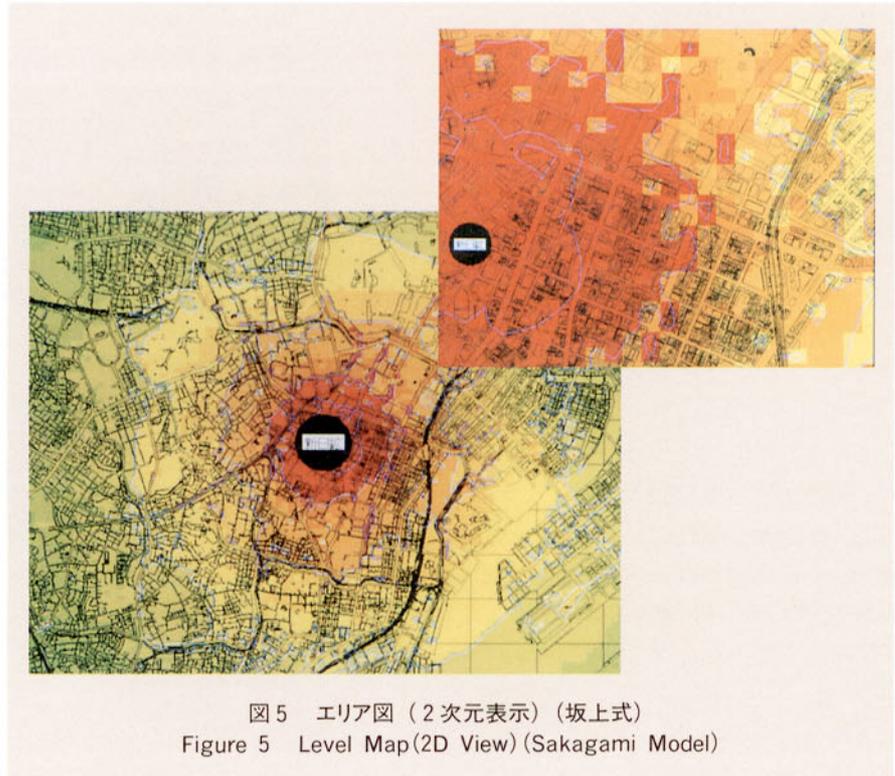


図5 エリア図（2次元表示）（坂上式）
Figure 5 Level Map(2D View)(Sakagami Model)

地局を選択する方式での評価について説明する。CELLDESでは、エリア内の各位置で各基地局からの電波の受信レベルを比較し、最も受信レベルが高い基地局をその位置における勢力基地局として、勢力エリアを自動的に判定する。そして、

その勢力エリア内の通信品質を定量的に評価する。

図7は勢力エリア内における受信レベルの分布を示している。統計処理（累積分布表示）した結果を表示しているため、定量的な評価が行える。

なお、評価する範囲を手入力（マウス入力）で指定することも可能であり、任意の範囲の通信品質を評価することもできる。

チャネルの最適配置

移動通信では有限な周波数資源を有効に利用するため、同一チャネルおよびスペクトルの一部重なりがあるインタリーブチャネル（以下、隣接チャネルと呼ぶ）を干渉妨害がない距離を隔てて繰り返し使用している。この場合、同一周波数の繰り返しを上手に行えば、周波数利用効率は向上するが、基地局数が多くなると、この作業を手で行うことは非常に困難となる。

ところで、基地局のパラメータ条件お

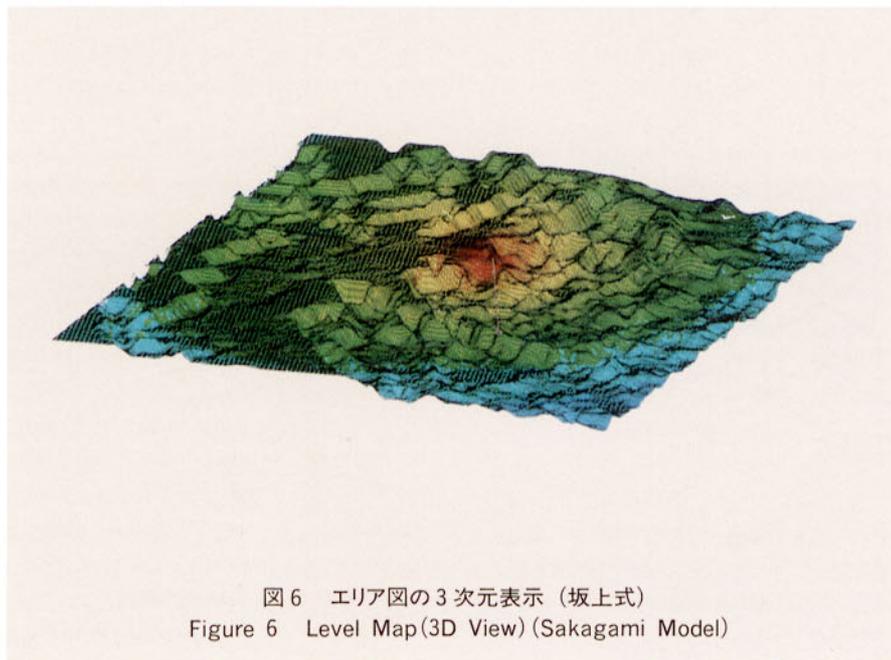


図6 エリア図の3次元表示（坂上式）
Figure 6 Level Map(3D View)(Sakagami Model)

よび伝搬損失がすべて同一であると仮定すれば、図8に示すように理想的な正六角形のセルができる。このような場合、干渉の受け方がすべてのセルで同一となることから、通信品質を満足する干渉量（以下、所要CIRと呼ぶ）を決めれば、チャンネル配置の基本パターンは一律に決まる。しかし、現実には各基地局のパラメータと場所ごとで伝搬特性は大きく変わることから、干渉の受け方は各セルで大きく異なり、図8に示すような規則的なチャンネル配置の基本パターンはできない。

CELLDESでは、図9に示すように、任意の基地局 B_i に着目し、その基地局がカバーするエリア端において基地局 B_i からの電波のレベル E_i と基地局 B_i 以外のほかの基地局 B_j ($i \neq j$) からの電波のレベル（干渉レベル） E_j を推定し、基地局 B_i と基地局 B_j の基地局間の干渉量 C_{ij} [$= E_i - E_j$ (dB)]を算出する。これらの計算をすべての基地局間で行い、干渉マトリックス $[C_{ij}]$ を作成する。このマトリックスは、たとえば基地局を100局とすれば、100行100列のマトリックスとなる。この干渉マトリックス $[C_{ij}]$ と所要CIRを用いて、計算機上で干渉が起らない

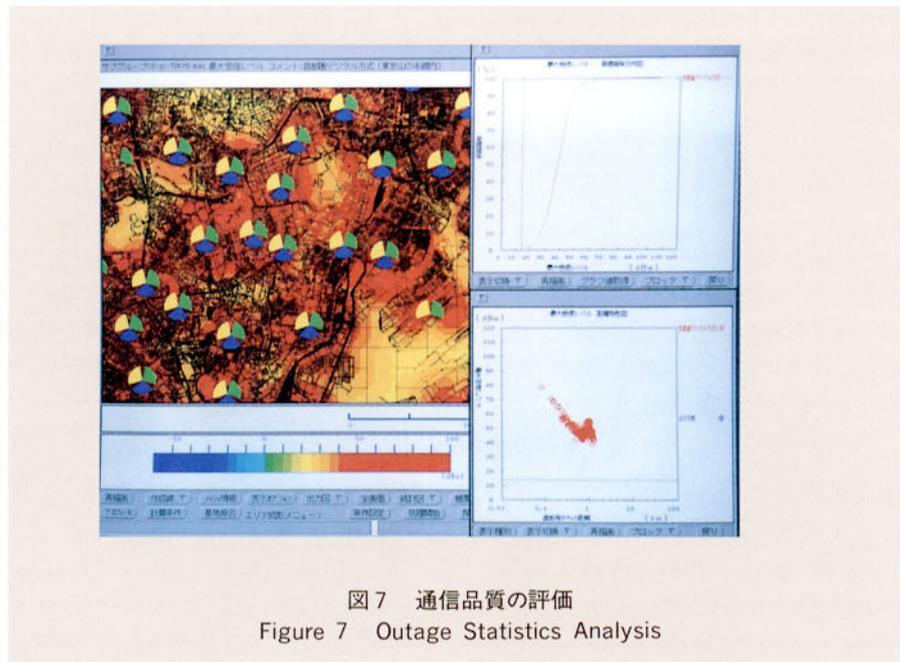


図7 通信品質の評価
Figure 7 Outage Statistics Analysis

チャンネル配置を探索し、チャンネル数が最も少なくなるチャンネル配置の基本パターン（最適チャンネル配置パターン）を作成する。これを用いることにより、より実際に近いチャンネル配置が可能となる。

図10は、一例として基地局数7局、各基地局を3セクタ（計21セクタ）でサービスエリアを構成した場合の最適チャネ

ル配置パターンを示す。ただし、同一チャンネルの所要CIRを20dB、隣接チャンネルの所要CIRを10dBとしている。

ところで、基地局数が多くなると最適パターンを探索する処理時間は急増するが、CELLDESでは多くの工夫を行い処理時間の短縮を図っている。しかし、それでも基地局数が100局を超えると処理時間が増大するため、現在、処理時間を一層短縮できる方法について検討を進めている。

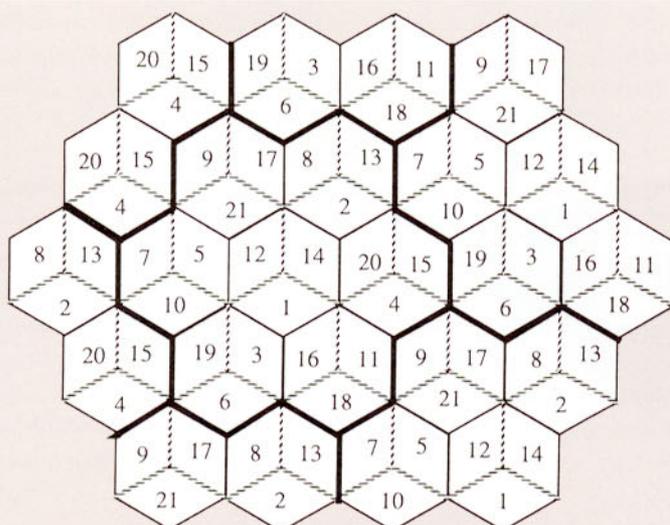


図8 理想的なセル構成でのチャンネル配置
(7セル×3セクタ繰り返し)

Figure 8 Example of Channel Assignment Under the Ideal Hexagonal Cell Configuration (7Cell×3Sector)

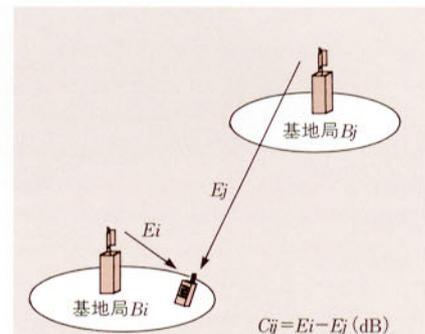


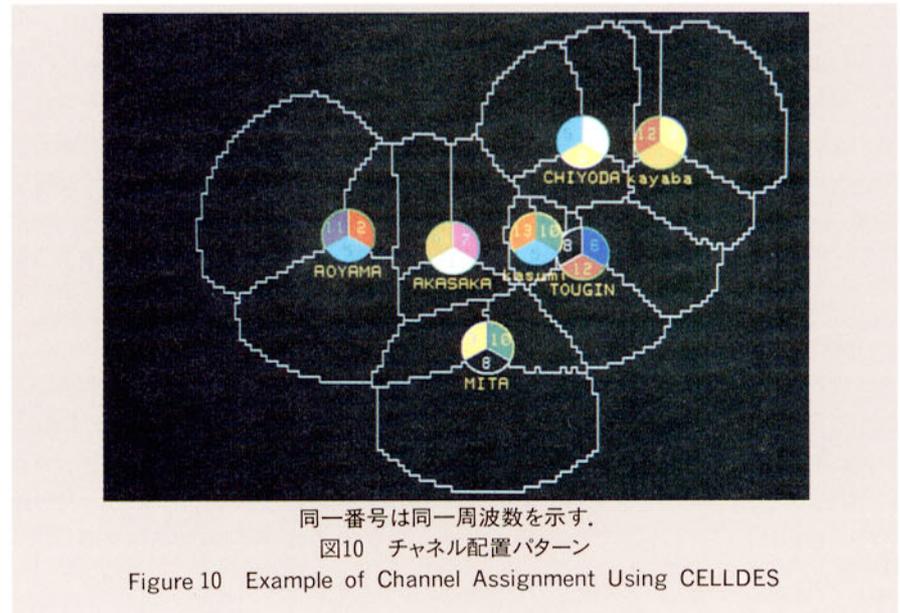
図9 干渉の関係
Figure 9 Interference Model

通信トラヒックの推定

各基地局ごとのチャンネル数の概算方法についてはすでに述べたが、最終的な基地局ごとのチャンネル数は、サービスエリア内での各基地局の勢力エリアを決定し、その内側の通信トラヒックを推定し、それに接続率などのサービス品質を考慮して必要なチャンネル数を算出する必要がある。そのためには、勢力エリアを求め、その内部の通信トラヒックを推定する必要がある。

各基地局の通信トラヒック量は、サービスエリア内の地理的な通信トラヒック分布が判っていれば、勢力エリア内それを積分することで容易に求まる。ところが、通信トラヒック分布に関する情報がなにも無い状況においてそれを推定することは不可能に近い。しかし、たとえば既設の基地局があり、基地局ごとのトラヒック量が判っていれば、それを基にトラヒック分布の概略を推定することは可能である。たとえば、大容量移動通信方式のエリア上にPDC方式の基地局をオーバーラップして構築する場合がこれに該当する。

その概略を図11で説明する。まず、既



設の基地局 B_i の勢力エリアを求め、その面積 S_i を算出する。次に、実際に測定された基地局ごとの通信トラヒック量 T_i を勢力エリア面積で割って、勢力エリア内の単位面積当たりのトラヒック密度 $\Delta T_i(X, Y)$ を算出する。ただし、 (X, Y) は位置座標を表している。すなわち、通信トラヒック分布が勢力エリア内で一様であると仮定した場合、算出した通信トラヒック密度 $\Delta T_i(X, Y)$ が地理的な分布を表している。そこで、新たに構築

する基地局 B_i' の勢力エリアを求めて、そのエリア内で通信トラヒック密度 $\Delta T_i(X, Y)$ を積分することで、その基地局の通信トラヒック量 T_i' が求まる。この通信トラヒック量 T_i' を基にアーランB式を用いて若干の計算を行えば、基地局ごとの所要のチャンネル数が求まる。CELLDESではこの通信トラヒック推定機能をシステム設計機能としてサポートしている。

その他の機能

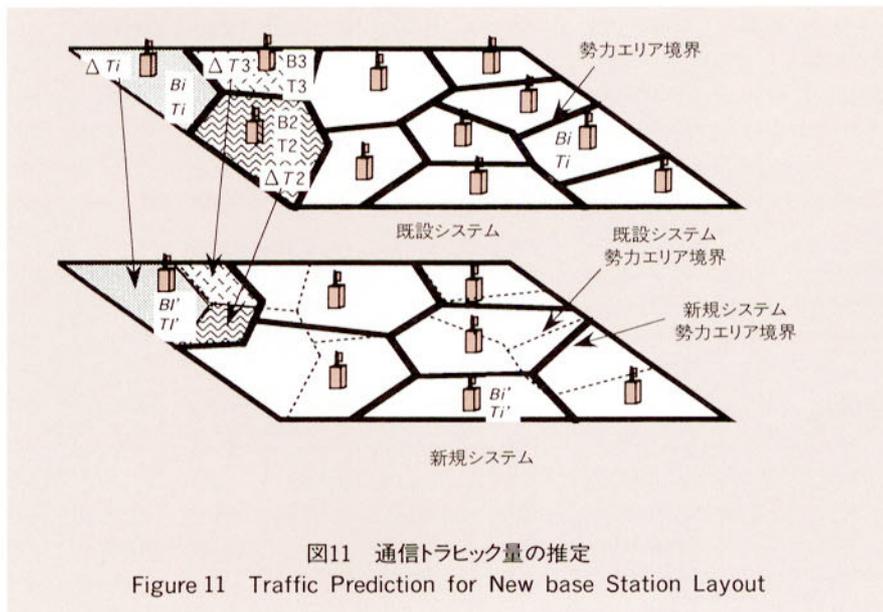
CELLDESではエリア推定、通信品質評価、チャンネル配置の基本機能のほかに多くの機能を有している。その中で特徴となるいくつかの機能を以下に示す。

① 上り回線の通信品質評価

上り回線（移動局送信、基地局受信）の通信品質の評価を統計処理の手法を用いて、下り回線（基地局送信、移動局受信）と同様に行うことができる。

② チャンネル切換え先セルの特定

複数の基地局から求めた勢力エリア図と受信レベル図を基に、基地局ごとに移動局のチャンネル切換え先セル（隣接セル）を自動検索する。こ



の場合、通信品質の評価の章で述べたように方式に応じて隣接セルの選択方法が異なるが、CELLDESではどちらの方式にも対応可能としている。

③ 伝搬遅延推定

デジタル移動通信では、遠方反射による伝搬遅延が原因となる符号間干渉が発生し、通信品質が劣化する場合がある。そこで、伝搬遅延の程度を与えるディレイスプレッド値を地形、建物データを用いて推定し、表示する¹⁰⁾。

④ 背景表示

CELLDESでの表示は地図背景を前提としている。表示をより効果的にするため、1/2,500のスケールの住宅地図、1/25,000のスケールの地形図が有する表示項目をレイヤ別（各64レイヤ）にDB化し、必要に応じた選択表示を可能としている。

あ と が き

本稿では、セル設計の基本的な考え方について説明し、その考え方に基づいてセル設計を大幅に自動化したセル設計システムCELLDESについて説明した。

CELLDESを開発した背景には、セル設計を完全に自動化しようとする気運が

高まったこと、伝搬損失の推定精度を大幅に向上できる“坂上式”が新たに提案され、それを用いれば従来のセル設計と比較して、精度の大幅な向上が図れる見通しが得られたこと、計算処理に必要なデータベースを容易に入手できるようになったこと、また計算機の処理能力が飛躍的に向上し処理の高速化が図れたこと、などが挙げられる。

セル設計システムは特に伝搬損失の推定精度や導入するシステム（方式）に大きく依存する。したがって、対象とする方式の設計思想を深く理解したうえで、より高精度な伝搬損失の推定法を開発し、完全自動化を目指していく必要がある。

文 献

- 1) 藤井、朝倉：“移動通信における無線回線設計支援システム”，信学'91秋大，B-226。
- 2) 朝倉、山崎、藤井：“移動通信におけるセル設計システム”，信学'94秋大，B-338。
- 3) H. Asakura, T. Fujii: “Combining Macro and Micro Cells in a Cellular System”, IEEE 2nd ICUPC Conf. Rec. pp. 728-731 (1993)。
- 4) 朝倉、藤井：“マクロセル・マイクロセルを用いた複合セル構成の最適化に関する一考察”，信学技報，RCS93-82 (1994-01)。
- 5) M. Hata: “Empirical formula for propagation loss in land mobile radio service”, IEEE Trans. Veh. Technol.,

VT-29, 3, pp. 317-325 (1980)。

- 6) 奥村、大森、河野、福田：“陸上移動無線における伝搬特性の実験的研究”，通研実報，16, 9, pp. 1705-1764 (1967)。
- 7) 坂上、久保井：“市街地構造を考慮した伝搬損失の推定”，信学論 (B-ID), J74-B-II, 1, pp. 17-25 (1991)。
- 8) 今井、大橋：“高架道路における伝搬特性”，信学'93春大，B-16。
- 9) 木村、岩村、楮原、秦：“移動無線伝搬損失推定の高速・高精度化”，信学'91秋大，B-225。
- 10) 小園、田中、青山：“移動通信における遅延スプレッド推定法の検討”，信学論 (B-ID), J76-B-II, 10, pp. 834-836 (1993)。