

レイトレース法を用いた屋内エリア推定システム IMAP(Indoor Micro cell Area Prediction system)の開発

コードレス電話などの移動通信方式においては、基地局を屋内に設置した場合のサービスエリアを把握することは非常に重要である。しかし、屋内では壁、パーティションなどが渾然とし、伝搬推定式を精度良く作成することは困難であった。そこで、送受信間の幾何学なレイトレースを求めるだけで比較的容易に電界強度が推定できる屋内エリア推定システムを開発したので、その概要について述べる。

ふじい てるや いまい てつお いぬかい ゆういちろう
藤井 輝也・今井 哲朗・犬飼 裕一郎

まえがき

事業所コードレス電話など屋内移動通信の需要は急増している。オフィスビルなどの事業所にこれらのシステムを導入する場合、基地局の設置を効率良く行うためには屋内のサービスエリアを精度良く推定できるエリア設計システムは不可欠である。

自動車・携帯電話システムのような屋外の比較的高い位置に基地局アンテナを設置し、主として路上をサービスエリアとするセルラ方式では、移動測定車で収集した電界強度のデータを統計的に分析して、最も測定値にフィットするように作成された伝搬推定式(回帰式)¹⁾²⁾を用いたエリア推定システムが実用化されている³⁾⁴⁾。しかし、屋内では壁、パーティション、什器などが渾然とし、そのレイアウトが複雑なため、屋内に基地局を設置した場合の伝搬推定式を精度良く作成することは困難であった。

屋内のような複雑なレイアウトに対し、電界強度を比較的精度良く推定できる方法にレイトレース(Ray Trace)法がある。

レイトレース法は、送信点である波源から放射された電波の素波(Ray)が壁や柱などの構造物で幾何光学的に反射、透過、回折を繰り返し受信点に到達する

過程を軌跡(Trace)として追跡し、受信点に到達したすべてのRayの電力を加算して電界強度を算出する⁵⁾⁶⁾。個々に異なる屋内レイアウトに対し、レイトレース法は送受信間の幾何学なトレースを求めるだけで、比較的容易に電界強度を推定できる利点がある。

本稿では、レイトレース法を用いた屋内エリア推定システムIMAP(Indoor Micro cell Area Prediction system)を開発したので、その概要について述べる⁷⁾。

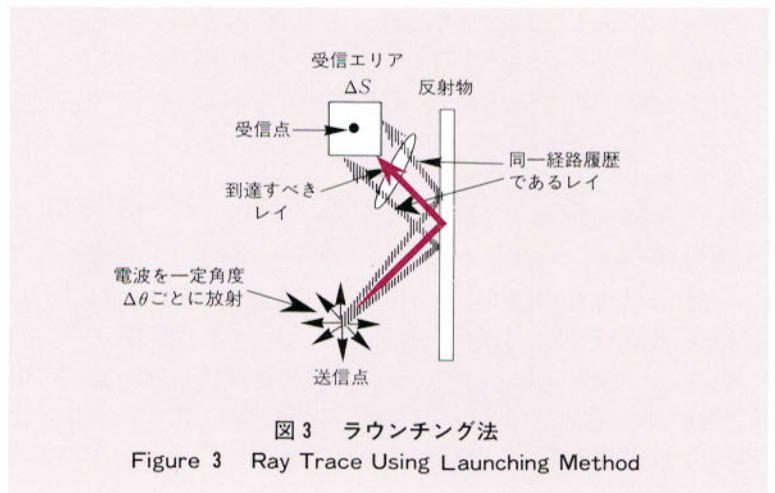
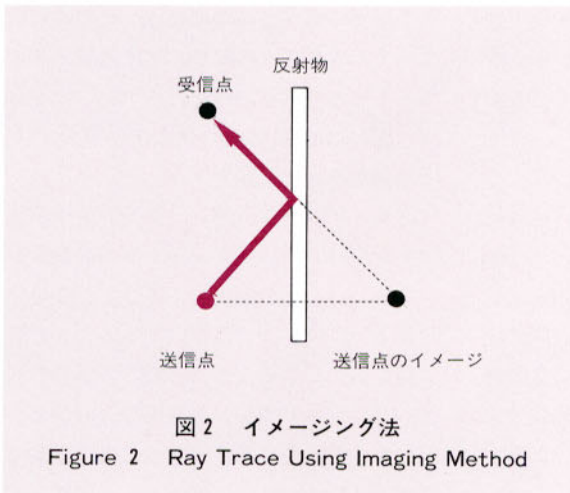
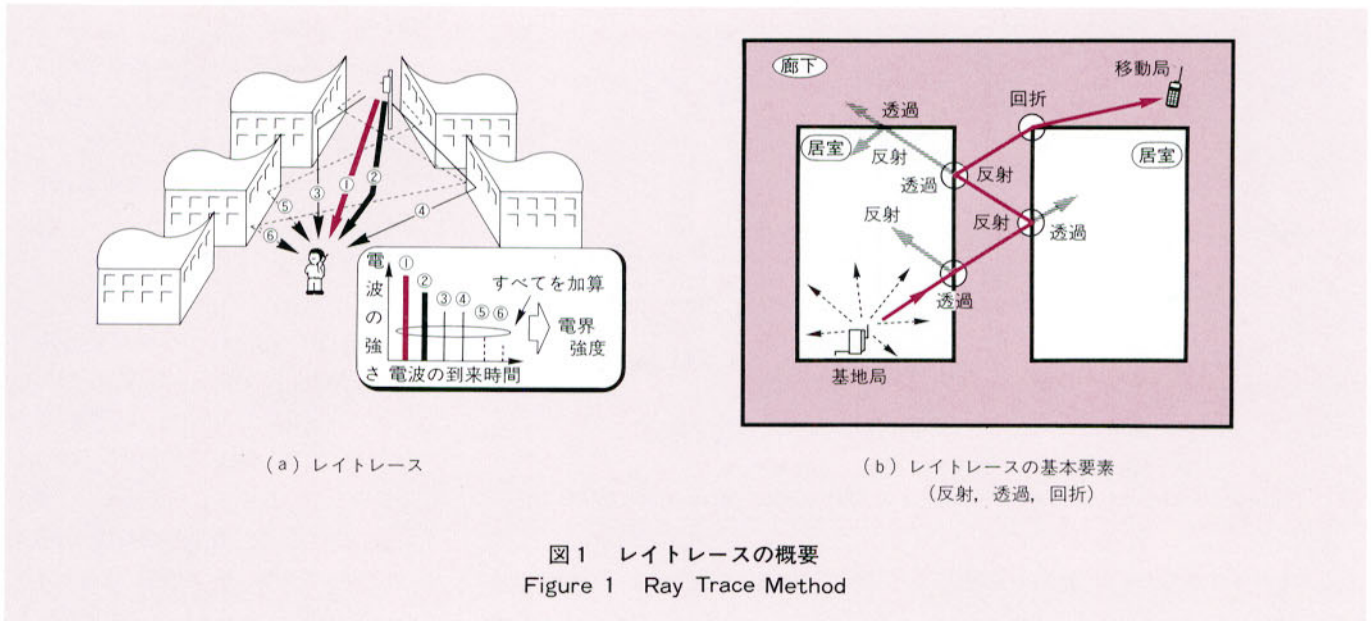
レイトレースとは

図1にレイトレースの概要を示す。送信点(基地局BS)から全方位に万遍なく放射された電波(Ray)は、途中の構造物で幾何学的に反射、透過、回折を繰り返して受信点(移動局PS)に到達する。受信点に達したすべてのレイを加算して電界強度を算出する。

この場合、送信点から受信点までのレイの軌跡を求める方法として、2とおりの方が知られている。1つは、イメージング法(imaging method)と呼ばれる方法であり、他方はラウンチング法(launching method)と呼ばれる方法である。イメージング法は、図2に示すように送信点と受信点の間の反射点、透過点を幾何学

的に求める。この方法は、受信点に到達するレイの計算を厳密に行うことができ、送信点と受信点間の反射面、回折点を決定するためには、すべての反射面、回折点の組合せの中から受信点に到達するレイを探索する必要があり、反射面、回折点の数が増すに従い、その計算量は指数関数的に増大する⁵⁾。

一方、ラウンチング法は図3に示すように、送信点から一定角度 $\Delta\theta$ ごとに離散的にレイを発射(launching)させて、その軌跡を逐次追跡して、受信点に到達するレイの電界強度を算出する。この方法は、イメージング法のようにすべての構造物の反射面、回折点の組合せを求める必要がないため、計算量の増大は抑えられるが、離散的な角度でレイを発射させるため、受信点に完全に一致するレイが求まる確率は極めて小さい。そこで、受信点の周囲に一定の受信エリア ΔS を定義して、その受信エリア ΔS 内に到達したレイをその受信点に到達したレイと見なして電界強度を算出する。しかし、ラウンチング法ではレイを発射する角度 $\Delta\theta$ 、受信エリア ΔS の大きさに応じて受信点に到達するレイの数が異なり、電界強度の推定値もそれらに応じて変化することから、何らかの最適化が必要となる。またレイを発射する角度 $\Delta\theta$ を小さくし、さらにレイの反射、透過、回折の最大回数を大き



く設定すれば推定精度はそれなりに向上するが、計算量もそれに応じて増加する⁹⁾。ラウンチング法を用いる場合は、これらには十分注意を払う必要がある。

IMAPでのレイトレース

IMAPでは、計算処理の高速性を重視してラウンチング法を採用し、また推定精度の向上のため、壁、パーティションなどに加え、床、天井を考慮に入れた3次元のレイトレースを行っている。ところで、前章で述べたように推定精度と計算時間はトレードオフの関係にあり、推定精度の向上を図れば計算時間の増大は避けられない。IMAPでは推定精度を大きく劣化させない範囲で、計算量を削減で

きる幾つかのアルゴリズムを適用した。以下では、それらについて述べる。

■受信エリアΔSの最適化

計算時間の短縮を図るため、レイの発射角度 $\Delta\theta$ を大きく設定した場合について考えよう。例えば、受信エリア ΔS を必要以上に小さく設定すれば、到達すべきレイが到達しないため推定精度は低下する。また、 ΔS を必要以上に大きく設定すれば、逆に実際よりも多くのレイが到達するため、推定精度は同様に低下する。そこで、 $\Delta\theta$ に応じて ΔS を適応制御することも考えられるが、その制御は非常に複雑であり、一般には困難である。

IMAPでは本来到達しないレイの加算処理を避けるため、各レイごとに通過した反射面、透過面、回折点の経路履歴を

記憶させておき、同一履歴を持つレイが受信エリア ΔS に複数到達した場合は、それが唯一となるように適応処理を行っている。この制御により、受信エリア ΔS をある程度大きくしても重複したレイの加算処理を避けることができ、推定精度の向上が図れる。

■計算処理の高速化

3次元のラウンチングを行うためには、立体的にレイを放射する必要がある。水平面方向だけに電波を放射する2次元のラウンチングと比較して計算量は大幅に増大する。そこで、IMAPでは2次元のラウンチングとおおよそ等しい計算量で、3次元のラウンチングと同程度の推定精度を得るため次のような計算処理を行っている。まず、図1(b)に示すように天井、

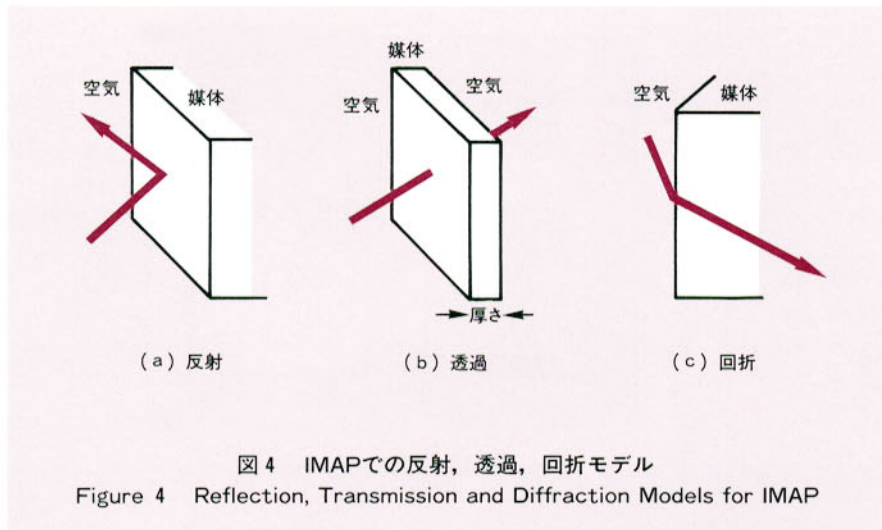


図4 IMAPでの反射、透過、回折モデル

Figure 4 Reflection, Transmission and Diffraction Models for IMAP

床面の反射を考慮しない2次元のレイトレースを行う。次に、2次元で求めたレイトレースに対してさらに天井、床だけが反射面となるレイトレース（3次元レイトレース）を求める。ただし、3次元レイトレースにおいて天井、床面での反射点はイメージング法で求めている。さきほどの2次元的なレイトレースにこの3次元レイトレースを加えたレイトレースをもとにして電界強度の計算を行う。すなわち、IMAPでは、3次元の全方位に対してレイの放射は行わないで、受信電界強度に大きく寄与する方向だけと限定することで、計算時間の大幅な短縮を図っている。

■電波伝搬のモデル化

送受信間のレイトレースに基づいてレイごとの電界強度の計算を行う。電界強度は、反射、透過、回折されるごとに減衰し、また受信点に到達するまでの延べ距離に応じて弱くなる。IMAPでは、反射係数 R は図4(a)で示すように厚さが無限と仮定した媒体に電波が斜め入射した時のフレネルの反射係数で与えている⁸⁾。透過係数 T は図4(b)に示すように有限の厚さを持つ媒体に電波が斜め入射したときのフレネルの透過係数で与えている⁸⁾。回折係数 D はGTD (Geometrical Theory of Diffraction) を用いて、図4(c)に示すようにその形状が楔である媒体に電波が斜め入射した時の回折係数で与えている⁹⁾。これらの係数を用いて電界強度を計算する。

今、受信点に到達したレイの電界強度を E_i とすると、 E_i は反射面 j の反射係数 R_j 、透過面 k の透過係数 T_k 、回折点 l での回折係数 D_l 、および送受信アンテナ特性 G_t, G_r を用いて次のように表すことができる。

$$E_i = \frac{K \cdot P_t \cdot G_t \cdot G_r}{r^2} \prod_j R_j \cdot \prod_k T_k \cdot \prod_l D_l \quad (1)$$

ただし、 P_t は送信電力、 K は波長などで決まる定数であり、 r は送受信点間の延べ距離を表している。受信点での電界強度 E は(1)式で与える各レイの電界強度を E_i を加算して次のように計算することができる。

$$E = \sum_i E_i \quad (2)$$

なお、具体的な計算式は参考文献^{8)~10)}に譲る。

IMAPの構成

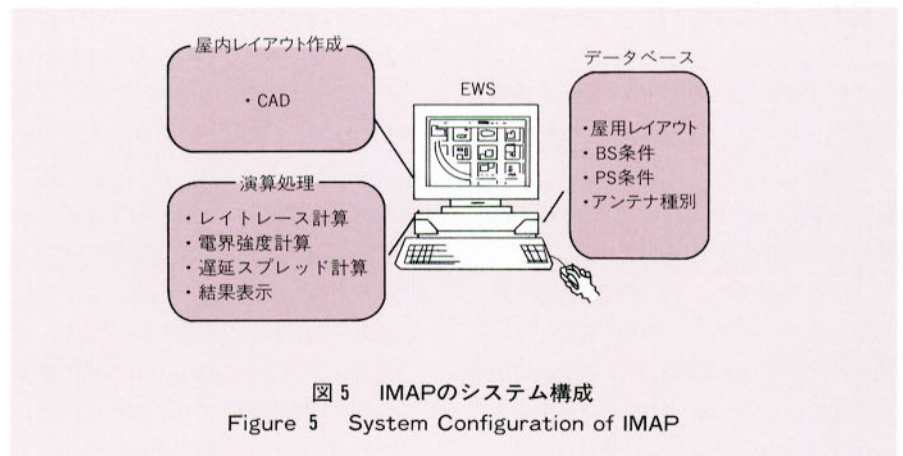


図5 IMAPのシステム構成

Figure 5 System Configuration of IMAP

■システム構成

図5にIMAPのシステム構成を示す。IMAP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。

■機能構成

図6にIMAPの処理の流れを示す。まず、CAD(Computer Aided Design)を用いて屋内レイアウトを作成し、壁、パーティションなどの部材に電気的特性を与える。次に、作成した屋内レイアウトを処理して、レイトレースのモデル化を行う。続いて、BS条件、PS条件、計算条件に従ってラウンディング法によるレイトレースを行い、各レイごとの電界強度 E_i を計算する。評価処理では、その結果をもとに受信点での電界強度 E 、遅延スプレッドなどの計算処理を行う。

図7にIMAPの機能構成を示す。その主要機能を以下に説明する。

- ・レイアウト作成部/計算モデル作成部
- IMAPは3次元のレイトレースを行うため、3次元の屋内レイアウトが必要である¹⁰⁾。IMAPでは屋内レイアウトを簡易に入力できるように、市販のCADをベースにユーザフレンドリーな入力システムを実現している。概念的には、建築の図面を作成するのに近い入出力環境を実現している。例えば、各階で共通な支柱、外壁などをまず入力し、次に各階ごとのレイアウトを入力する構成となっている。各階ごとの部材は2次元の形状と高さを入力して作成する。その結果は3次元的に表示できる(鳥瞰図)。図8はこのCAD

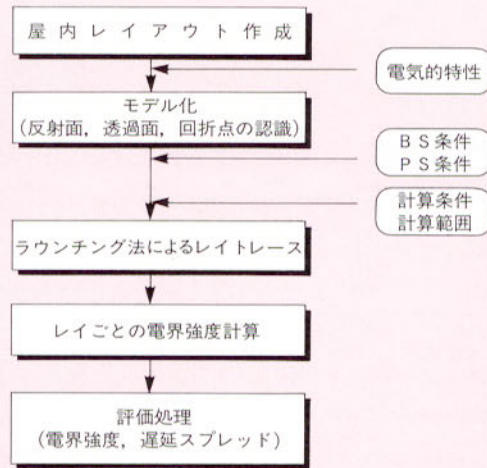


図6 IMAPの処理の流れ

Figure 6 Flow of IMAP

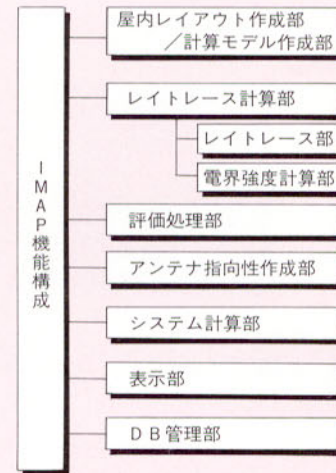


図7 IMAPの機能構成

Figure 7 Functional Structure of IMAP

を用いて入力した屋内レイアウトの一例である。

次に、作成した壁、パーティションなどの部材に対して電気的特性（誘電率 ϵ 、透磁率 μ 、導電率 σ ）を与える。例えば、壁内に窓がある場合は壁と窓に各々異なる電気的特性を付加する。部材およびその電気的特性はあらかじめデータベース（DB）化しておいて、レイアウト作成時にそれから選択する。

計算モデル作成部では、作成したレイアウトの構成要素から反射面、透過面、回折点を分析し、レイトレースに必要な計算モデルへと自動変換する。

・レイトレース部

レイトレースは、まず送信点から一定角度ごとに放射されたレイに対してレイアウトを構成する要素を検索して、反射面、透過面となり得る構成要素を探索する。反射面が見つければ入射角（＝透過角）と反射角を計算して、その構成要素で反射するレイと透過するレイと分岐させる。分岐されたレイはそれぞれ計算した角度で再び放射させて、次の反射物となり得る構成要素の検索を行う。レイトレースの処理時間はこの検索時間に大きく依存する。そこで、IMAPでは、あらかじめ屋内レイアウトを複数の範囲（ブロック）に分けておいて、放射されたレイの方向から次の反射面が予想されるブ

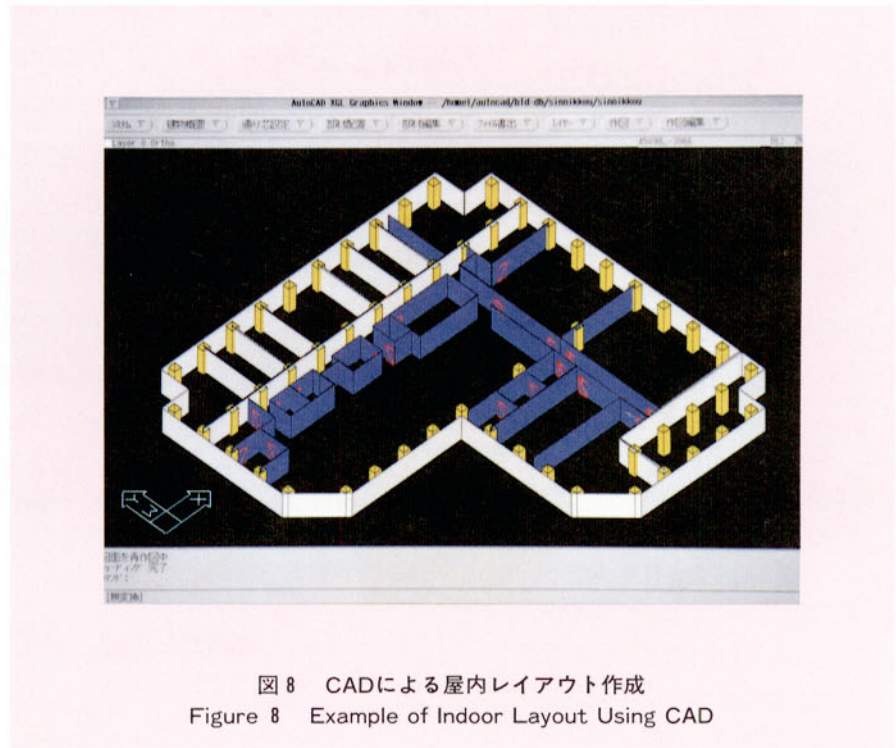


図8 CADによる屋内レイアウト作成

Figure 8 Example of Indoor Layout Using CAD

ロックを優先的に検索することで、検索処理の高速化を図っている。

図9は、角度 $\Delta\theta (=45^\circ)$ で放射した場合のレイトレース表示の一例を示す。ただし、反射および透過の最大回数は各2回としている。

・評価処理部

IMAPにおける評価処理の基本は電界強度計算と伝搬遅延を示す遅延スプレッド（delay Spread）計算である。ここで

遅延スプレッドとは、図11に示す遅延プロファイルをもとにして、伝搬遅延時間の分散（標準偏差）を計算したもので、その大きさは多重伝搬路においてデジタル信号伝送を行う場合の符号間干渉の評価を与えている¹¹⁾。

評価処理では、まずPSが受信する高さが一定である2次元の受信面を仮定して、その受信面を大きさが ΔS であるメッシュに分割する。そして、各メッシュを通過

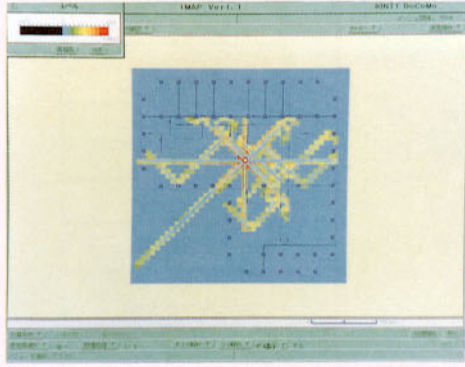
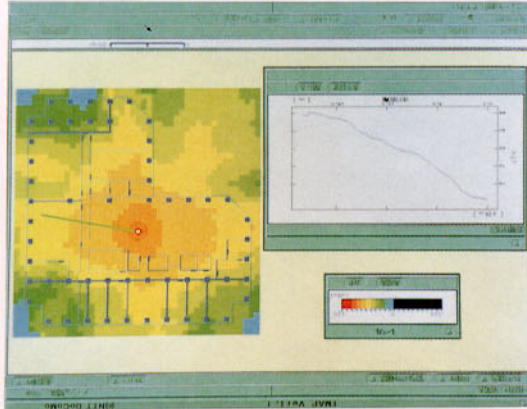


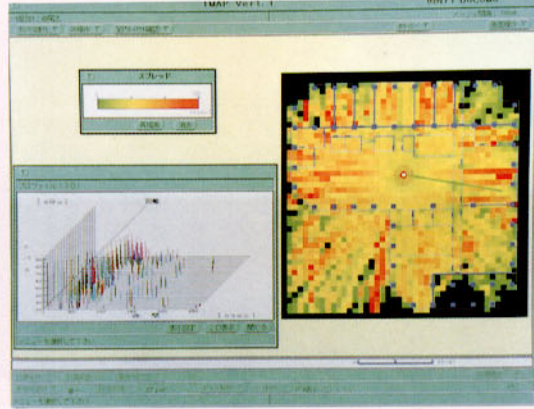
図9 レイトレース例
Figure 9 Example of Ray Trace

表1 基地局, 移動局の設定項目
Table 1 Input Parameters for BS and PS

| 基地局 (BS) 項目 | 移動局 (PS) 項目 |
|--------------|--------------|
| 位置 | 位置 |
| 高さ | 高さ |
| 周波数 | 受信アンテナ利得・指向性 |
| 送信電力 | 給電線損失 |
| 送信アンテナ利得・指向性 | |
| 給電線損失 | |



(a) 電界強度



(b) 遅延スプレッド

図10 結果表示例
Figure 10 Display Windows in IMAP

するレイごとに電界強度を求め、それらをもとにメッシュごとの電界強度と遅延スプレッドの計算を行っている。ただし、場所的な変動誤差を取り除くために、メッシュごとの計算結果をさらに一定の範囲内で平均化して、そのメッシュにおける電界強度値または遅延スプレッド値としている。

計算に必要な項目は表1に示すようにBS条件, PS条件および計算範囲, 計算条件 (ラウンチング角 $\Delta\theta$, 受信エリア ΔS , 最大反射回数, 最大透過回数, 最大回折回数, 平均化距離) である。

・表示部

推定結果の表示は、図10に示すように電界強度, 遅延スプレッドの各値を色別

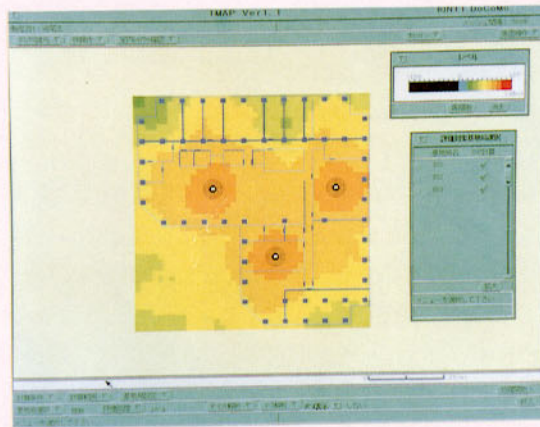


図11 エリア図 (複数基地局)
Figure 11 Display Example on Signal Level

に表示することを基本としている。また、同図に示すように経路を指定し、その経路長を横軸として電界強度値、遅延スプレッド値を表示することもできる。

・システム設計部

エリア設計で重要なことはサービス範囲が与えられた場合に、その範囲内で所定の通信品質が得られるようにBSを効率良く設置することにある。システム設計部はこの作業を支援する。すなわち、複数のBSを設置した場合に、所定の通信品質（電界強度）が得られるエリアを求める。具体的には、各BSでの電界強度を計算し、そのうち電界強度が最大となるBSとそのときの電界強度値を求めて表示する。前者は各BSが守備範囲であるエリアを示しているので勢力エリア図と呼ばれ、後者は一般にサービスエリア図と呼ばれている。表示した結果、サービス範囲内において十分な通信品質が得られていないことが分かれば、BSの位置を変更するか、あるいはBSを追加するなどの判断を行う必要がある。IMAPではこの判断を容易にし、BSの追加、位置の変更などの対応が簡易に行えるようにしている。図11にBSを複数設置した場合のエリア図の一例を示す。

推定精度

IMAPの推定結果と実測結果を比較する。推定する場所はNTTDoCoMoの研究部門があるNTT横須賀電気通信研究所の9階とし、その屋内レイアウトを図12(a)に示す。同図(b)はBSを同図(a)に示す位置に設置したときに表2に示す諸元で電界強度を推定した結果を示す。また、受信点BSと壁で遮られている廊下内に設けた場合の伝搬損失の距離特性を同図(c)に示す。一方、実際にBSを設置して、推定した場合と同一条件で電界強度測定器を用いて伝搬損失を測定した結果を同図(c)に併せて示している⁷⁾¹²⁾。推定結果と実測結果は比較的よく一致しており、IMAPの有効性が確認できる。

なお、この例で同図(b)の電界強度を推定するのに要した時間はSUN（モデル

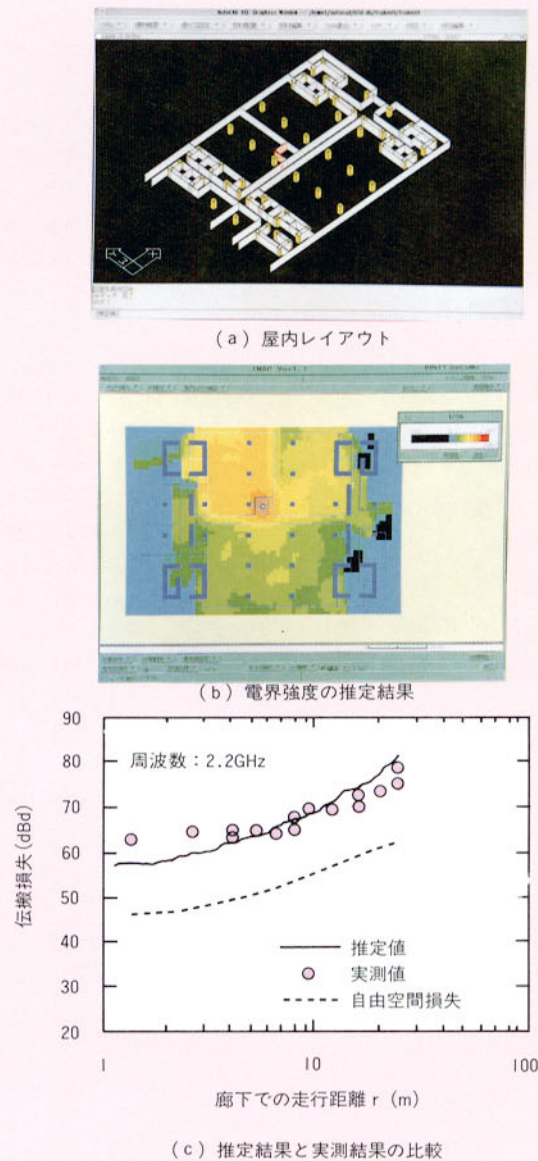


図12 推定結果と実測結果の比較

Figure 12 Predicted and Measured Propagation Loss

表2 基地局、移動局諸元

Table 2 Parameters of BS and PS

| 基地局 (BS) 項目 | 設定値 |
|--------------|-----------------|
| 高さ | 2 m |
| 周波数 | 2.2GHz |
| 送信電力 | 10mW |
| 送信アンテナ利得・指向性 | 0dBd (半波長ダイポール) |

| 移動局 (PS) 項目 | 設定値 |
|--------------|-----------------|
| 高さ | 2 m |
| 送信アンテナ利得・指向性 | 0dBd (半波長ダイポール) |

SS20) を用いて数十秒足らずであった。

あとがき

本稿では、レイトレースとしてラウンチング法を用いた屋内エリア推定システムIMAPの概要について説明した。IMAPではレイの放射を必要最小限に限定し、3次元のレイトレースにおいてもラウンチング法の利点である計算処理の高速性を活かしている。また、最大の欠点であったレイの重複処理を履歴情報を用いた制御方法により克服し、推定精度の向上を図っている。さらにGUIを活用して操作性を大幅に向上させている。

今後、ますます需要が見込まれる事業所コードレス電話などの屋内移動通信方式のエリア設計システムとしてIMAPの果たす役割は非常に大きいと考えられる。

文 献

- 1) 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, Vol. 16, No. 9, pp. 1705-1764 (1967)
- 2) 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-II), J74-B-II, No. 1, pp. 17-25 (1991)
- 3) 藤井, 朝倉, 山崎: “移動通信におけるセル設計システム”, 本誌, Vol. 2, No. 4, Jan., 1995
- 4) 朝倉, 山崎, 藤井: “移動通信におけるセル設計システム”, 1994秋季信学総全大, B-338
- 5) 高橋, 他: “イメージ法を用いた電波伝搬シミュレーション”, 信学技報, RCS94-125 (1994)
- 6) S. Y. Seidal and T. S. Rappaport: “Site Specific Propagation Prediction for Wireless In-Building Personal Communication System Design”, IEEE Trans. VT43, No. 4, pp. 879-891 (1994)
- 7) 今井, 犬飼, 藤井: “屋内セル伝搬推定システムの提案”, 1995信学秋季全大, B-214
- 8) 例えば, M. Born and E. Wolf: “Principles of Optics”, Pergamon Press (1974)
- 9) J. Wiart, A. Marquis and M. Juy: “Analytical Microcell Pathloss Model at 2.2GHz”, Prec. PIMRC '93, pp. 30-34 (1993)
- 10) S. F. Fortune, et al.: “WIZE Design of Indoor Wireless System”, IEEE Computational Science & Engineering, Vol. 4, pp. 58-68 (1995)
- 11) 例えば, 桑原(監修): “デジタル移動通信”, 第3章, 科学新聞社 (1992)
- 12) 犬飼, 今井, 藤井: “部屋から廊下への透過伝搬特性”, 1995信学春季全大, B-2.