

# 移動側送信・電界強度測定システム

移動通信では、一般にサービスエリア内の通信品質の評価は電界強度の測定結果を基に行われている。この場合、移動測定車に送信機を載せて電波を送信し、基地局に設置した受信機でその電波を受信する電界強度測定（移動側送信測定）は、1つの送信機と1つの周波数で測定できることから、特に限られた周波数資源で複数の基地局を同時測定する場合には非常に魅力的な測定方法である。

本稿では、まず一定区間での電界強度を簡易に測定できる移動側送信測定法を提案し、その測定精度を明らかにする。続いて、この測定法に基づいて移動側送信・電界強度測定システムを開発したので、その概要を説明する。

さとう ひろのぶ まえだ ゆたか ふじい てるや  
佐藤 浩信・前田 穰・藤井 輝也

## まえがき

近年、携帯・自動車電話などのセルラ移動通信システムに対する需要は急激に増大しており、有限な周波数資源でこの需要に対処するため無線ゾーン（セル）の極小化が積極的に進められている。そのため、基地局数は増大し、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無線回線設計（セル設計）は非常に複雑化している。

実際のセル設計では、まず電波伝搬を推定し、机上検討で基地局配置を決定し、それに基づいて、システムを構築する。その後、移動測定車などを用いて道路上の電界強度を測定し、設計どおりにサービスエリア内で通信品質が確保されているか否かを評価・確認する<sup>1)~3)</sup>。

従来、電界強度測定は基地局に設置した送信機から電波を送信し、移動測定車に載せた受信機でその電波を受信して測定する基地局送信→移動局受信測定（基地側送信測定）がシステム化されている<sup>4)~7)</sup>。しかし、複数の基地局の電界強度を基地側送信測定法を用いて同時に測定するには、基地局数分だけの送信機を用意し、かつ異なる周波数の電波を送信する必要がある、特に限られた周波数資源

で複数の基地局を同時測定するには限度があった。

一方、移動測定車に送信機を載せて電波を送信し、基地局に設置した受信機でその電波を受信する移動局送信→基地局受信測定（移動側送信測定）は、1つの送信機と1つの周波数で測定できることから、特に限られた周波数資源で複数の基地局を同時測定する場合には非常に魅力的な測定方法である。しかしながら、この測定方法では電界強度を平均化するために必要な等距離間隔ごとのサンプリング情報や位置情報を受信機が設置されている基地局でリアルタイムに取得する必要がある。例えば、移動側でそれらの情報を符号化し、送信波でリアルタイムに伝送する方法が提案され、実用化されている<sup>8)</sup>。しかし、信号伝送のための送受信機が必要となる、弱電界地域では高信頼度の情報伝送が行えないなどの課題があった。

本稿では、移動側送信測定において、基地側送信測定と同様に一定区間での電界強度の中央値（平均値）を簡易に測定でき、しかも位置情報も容易に付与できる測定方法を提案し、その測定精度を基地側送信測定と比較明らかにする。

また、この測定法に基づいて移動側送信・電界強度測定システムを開発したの

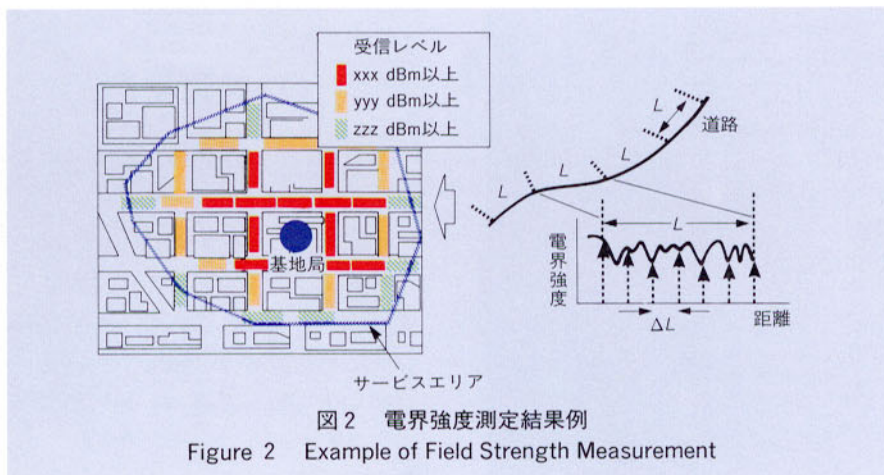
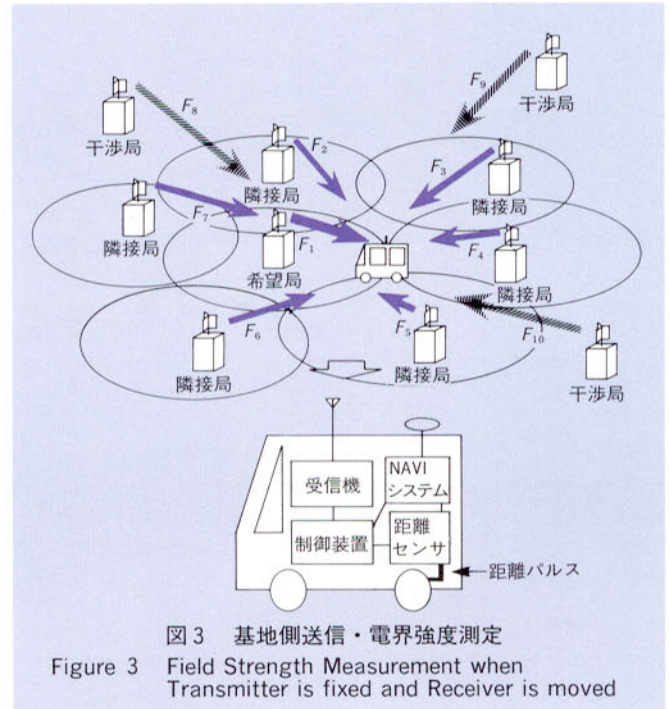
でその概要を説明する。

## 開発の背景

セルの極小化に伴い、同一周波数や一部スペクトラムの重なりがある隣接周波数（インタリーブチャンネル）を近距離で再利用するため、干渉に対する通信品質の確認を行う基地局数が増大する。例えば図1に示すようなセル構成の場合、自身がカバーするエリアを特定するのに、必要な隣接基地局の測定を含めて数十の基地局の電界強度を測定する必要がある。したがって、従来よく用いられている基地側送信測定で効率よく、例えば1回の走行ですべての電界強度測定を行うには、それぞれの基地局から異なる周波数の電波を同時に送信する必要があった。限られた周波数でこのような効率的な測定を行うには、移動側送信測定は非常に有効な方法である。

## 電界強度測定

移動通信では、移動測定車などでサービスエリアをくまなく走行し、各基地局の電界強度を測定し、図2に示すようにその値を地図上にマッピングして電界強度地図を作成している（下り回線電界強



度地図)。この場合、電界強度は、瞬時の電界強度を等距離間隔 $\Delta L$  [m]ごとにサンプリングし、それを一定区間 $L$  [m]で平均化した短区間の電界強度として算出する。いま、距離 $\Delta L$ ごとにサンプリングした電界強度を $E_i$  ( $i$ は整数)とすると、その区間における電界強度の平均値 $E$ は、

$$E = \sum_{i=1}^N E_i / N \quad (1)$$

となる。ただし、 $N$ はサンプリング数を表しており、 $N = L / \Delta L$ である。従って、受信側ではサンプリング情報が不可欠である。

以下では基地側送信による電界強度測定と移動側送信による電界強度測定の特徴について説明する。

### ■ 基地側送信・電界強度測定

基地側送信測定は図3に示すように、基地局ごとに設置した送信機から異なる周波数 ( $F_1, F_2, \dots, F_m$ ) の電波を送信し、移動測定車に載せた受信機でその電波を受信する。複数の基地局の電界強度を同時に測定するには基地局数だけの送信機、および基地局数だけの異なる電波を用意する必要がある。

一方、等距離間隔のサンプリング情報が、例えば車軸から得られる回転パルス(距離パルス)を必要な距離間隔で分周することで容易に得られること、緯度、経度などの位置情報が移動測定車に設置したNAVIGATIONシステム (NAVIシステム) などの位置測定装置から容易

に取得できること、さらに電界強度情報とあわせてデータ化できるため、測定結果を地図上にマッピングする処理作業が比較的容易にできるなどの利点がある<sup>6)~7)</sup>。

### ■ 移動側送信・電界強度測定

図4に示すように移動測定車に送信機を載せて電波を送信し、基地局に設置した受信機でその電波を受信する移動側送信測定は、1つの送信機と1つの周波数 ( $F_1$ ) で測定できる利点がある。しかしながら、基地側送信測定のように等距離間隔 $\Delta L$ のサンプリング情報や位置情報を受信機が設置されている基地局で取得することは一般には困難である。

例えば、移動測定車の移動速度 $v(t)$ が等速度 ( $v(t) = v$ で一定)であれば、時間間隔を $\Delta T = L/v$ で電界強度をサンプリングして演算処理を行えば、等距離間隔で処理した結果と等しくなる。しかしながら、移動測定車の移動速度がダイナミックに変化すると、電界強度を一定距離間隔ごとにサンプリングするためのタイミング情報が受信側では得られなくなり、一定区間での電界強度を精度良く求めることができなくなる。したがって、移動側送信測定を行うには何らかの手段により等距離間隔のサンプリング情報を受信

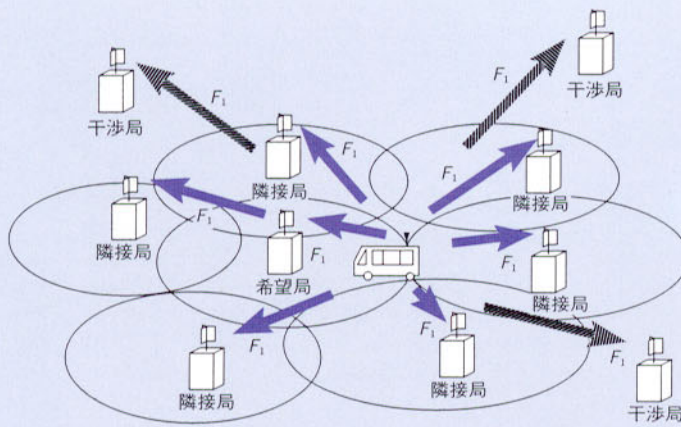


図4 移動側送信・電界強度測定  
Figure 4 Field Strength Measurement when Receiver is Fixed and Transmitter is Moved

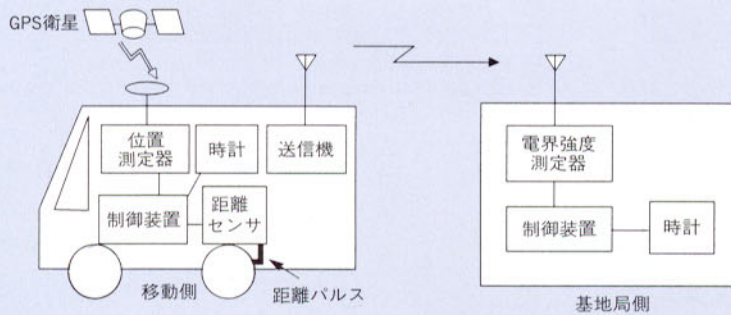


図5 測定構成  
Figure 5 Configuration of Field Strength Measurement

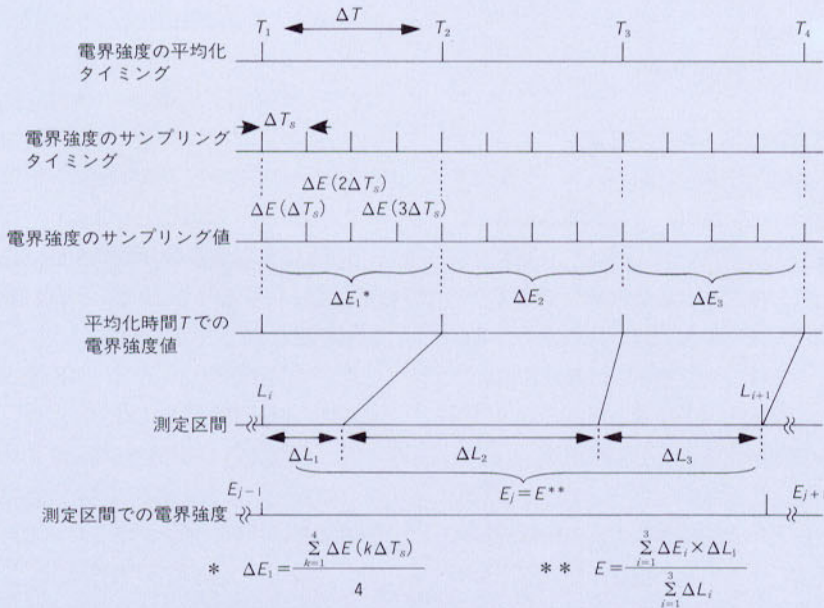


図6 測定アルゴリズム  
Figure 6 Measurement Algorithm

側で得る方法を考えなければならない。

受信側でサンプリング情報を得る方法の1つに、移動側でそれらの情報を符号化し、送信波でリアルタイムに伝送する方法が提案されている<sup>8)</sup>。しかし、弱電界地域では高信頼度の情報伝送が行えないため、測定精度が低下する。この点を解決する方法として、これらの情報をメモリに蓄積しておいて、測定終了後にフロッピーディスクなどを用いて転送し、処理する方法が考えられる。例えば、移動側では等距離間隔のサンプリング情報  $i\Delta L$  ( $i$ は整数)を得ることにその時刻  $T_i$ を蓄積し、基地側では時刻  $T_i$ ごとに電界強度情報  $E_i$ を蓄積しておく。測定終了後に、これらの蓄積データを集めて時刻  $T_i$ を媒介変数として等距離間隔毎の電界強度 ( $i\Delta L, E_i$ ) にデータ変換し、一定区間  $L$ ごとの電界強度  $E$ を算出する。このような方法を用いれば、高精度な測定が可能となることは容易に理解できる。

## 移動側送信・電界強度測定

本稿では、上述した時刻を媒介変数とする測定方法を基本とし、一定区間での電界強度の中央値(平均値)を基地側送信測定と同様に簡易に測定できる方法を提案する<sup>9)~10)</sup>。ここでは、その測定原理および測定精度について説明する。

### 測定原理

図5に測定構成を示す。移動測定車である送信側は、送信機、距離パルスから移動距離を測定する距離センサ、位置測定器、および測定開始からの時刻と併せて記録する制御装置で構成される。

一方、基地局である受信側は、電界強度測定器と測定開始からの時刻をあわせて記録する制御装置で構成される。ただし、送信側と受信側では、測定に関して時間同期を一定時間内で確立する必要がある。ここでは送信側と受信側の時間同期誤差を  $T_{diff}$ と定義する。

以下では簡単のため、送信側では移動距離を測定するものとして説明する。測定アルゴリズムを図6に示す。まず、送信側では電波を送信しながら、時間間隔

は800MHz帯とし、移動側送信測定では $\Delta T$ を1sec、 $L=40m$ としている。また基地側送信測定では $\Delta L=10cm$ 、 $L=40m$ としている。重み付け処理を行わない場合、特に停車している場合に誤差が大きくなっていることがわかる。

以下では、基地側送信測定で得られた各区分での電界強度を真値とし、移動側送信測定で算出した電界強度との差分を測定誤差として評価する。

図9は送信機の最大移動速度 $V_{max}$ と平均測定誤差の関係を示している。ただし、時間同期誤差 $T_{diff}$ を0としている。最大移動速度 $V_{max}$ が大きくなるに従い測定精度は低下する。これは、移動速度が速くなるにつれて区間 $L(=40m)$ を移動する時間が短くなり、移動する時間を $\Delta T=1sec$ の $M$

$\Delta T$ ごとにその時間内の移動距離 $\Delta L$ を求める。一方、受信側では時間間隔 $\Delta T$ ごとにその時間内の電界強度 $\Delta E_i$ を求める。ただし、 $\Delta E_i$ は $\Delta T_s$ ごとにサンプリングした電界強度データ $\Delta E(k\Delta T_s)$  ( $k$ は整数)の平均値(中央値)である。

いま、測定開始から $i$ 番目の時間間隔において測定した移動距離を $\Delta L_i$ 、測定した受信レベルを $\Delta E_i$ とする。ただし、送信側と受信側では、一定時間差内で時間同期はとれているものとする。ここで、測定区間 $L$ を移動するのにかかった時間を $M\Delta T$ (時間間隔 $\Delta T$ を単位として、 $M$ 個の時間)とすれば、測定区間 $L$ での電界強度 $E$ は、時間間隔 $\Delta T$ ごとに得られる電界強度 $\Delta E_i$ に対し、その間に移動した移動距離 $\Delta L_i$ で重み付けを行うことで、次式のように求めることができる。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M (\Delta E_i \times \Delta L_i)}{\sum_{i=1}^M \Delta L_i} \quad (2)$$

この演算処理により、送信機の移動速度に依存しないで、測定区間 $L$ での電界強度 $E$ を算出できる。以下では、演算処理した電界強度 $E$ について若干考察する。まず、一定速度 $v$ で移動している場合、 $\Delta L_i$ は一定となり測定区間 $L$ での電界強度 $E$ は次式となる。

$$E = \frac{\sum_{i=1}^M \Delta E_i}{M} \quad (3)$$

ここで、サンプル時間間隔 $\Delta T_s$ を $\Delta L/v$ とすれば上式は明らかに $\Delta L$ の距離間隔で電界強度をサンプリングした結果と等しくなる。次に、 $m$ 個のデータのうち、最初の $k$ 個は移動速度が0で停止し、残りの $M-k$ 個が一定速度 $v$ で移動している場合を考える。この場合、測定区間 $L$ での電界強度 $E$ は次式で与えられる。

$$E = \frac{(\sum_{i=1}^k (\Delta E_i \times 0) + \sum_{i=k+1}^M (\Delta E_i \times \Delta L_i))}{(\sum_{i=1}^k 0 + \sum_{i=k+1}^M \Delta L_i)} = \frac{\sum_{i=k+1}^M \Delta E_i}{(M-k)} \quad (4)$$

このように停止している $k$ 個の電界強度のサンプリング値は計算に反映されないため、 $\Delta L$ の距離間隔で電界強度をサンプリングした結果と等しくなる。

■ 室内実験

図7に室内実験系を示す。受信レベルの変動は伝搬シミュレータで発生させ、レイリ変動(最大ドップラー周波数 $f_D$ [Hz](=車速 $v$ /波長 $\lambda$ ))、対数正規変動(標準偏差6dB、最大変動周波数 $f_m$ [Hz](= $f_D/200$ ))が重畳した変動としている。

送信機の移動速度は車速制御装置で制御し、移動速度 $v$ は最大速度 $V_{max}$ [m/sec]の一様分布とする(ただし、速度の変更は1秒間隔ごと)。また、移動測定車が交差点などの信号で停止することを考慮して移動速度が0である割合を停止率 $T_{stop}$ とする。精度の評価では、(2)式で示す重み付け処理を行った場合(with weight)、および重み付けを行わない( $\Delta L_i \equiv 1$ )場合(without weight)について行う。

図8は測定結果例を示す。測定周波数

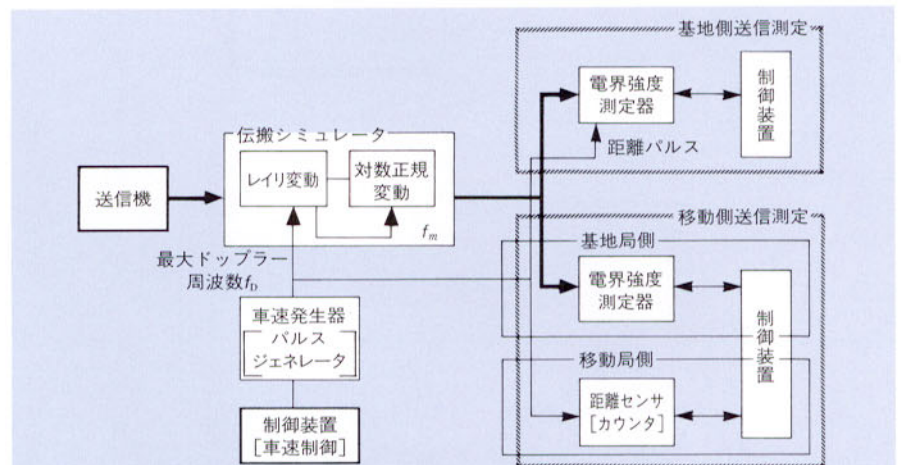


図7 室内実験系  
Figure 7 Cofiguration of Experimental Test

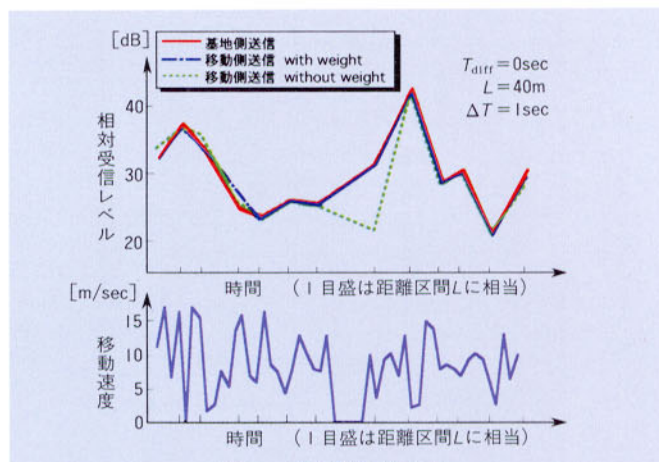


図8 電界強度測定例  
Figure 8 Example of Field Strength Measurement

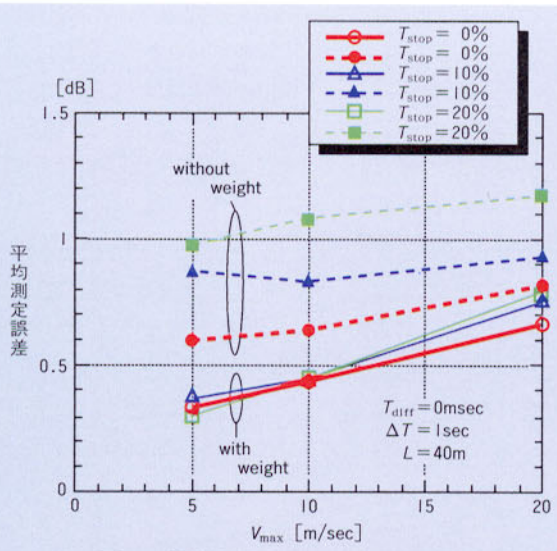


図9 最大移動速度 $V_{max}$ と測定誤差の関係  
Figure 9 Relation between Maximum Speed and Measurement Error

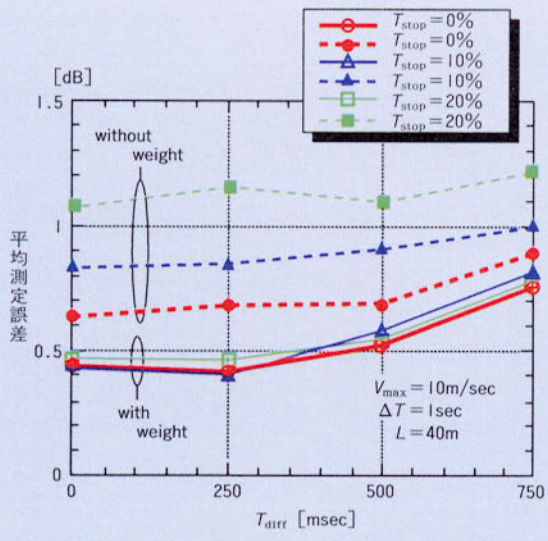


図10 時間同期誤差 $T_{diff}$ と測定誤差の関係  
Figure 10 Relation between Time Synchronized Error and Measurement Error

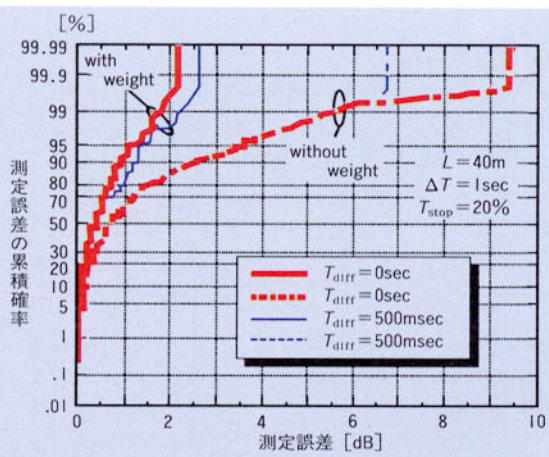


図11 測定誤差分布特性 (室内実験)  
Figure 11 Probability of Measurement Error

倍 (正数) とした測定では量子化誤差の影響が大きくなるためである。また、重み付け処理を行わない場合は、停止率 $T_{stop}$ により測定誤差は大きく影響を受けるが、重み付け処理を行えば、その影響を大幅に軽減できることがわかる。例えば、重み付け処理を行えば、 $V_{max}$ が10m/sec以内で $T_{stop}$ が20%においても平均測定誤差を0.5dB以下にできる。

図10は時間同期誤差 $T_{diff}$ と平均測定誤差の関係を停止率 $T_{stop}$ をパラメータとして示している。ただし、最大移動速度 $V_{max}$ は10m/secとしている。時間同期誤差 $T_{diff}$ が大きくなるに従い、測定精度は低下する。例えば、測定誤差を0.5dB以下にするには重み付け処理を行った場合、 $T_{diff}$ を250msec以下に制御する必要がある。

図11は、 $V_{max}=10m$ 、 $T_{stop}=20\%$ とした場合の測定誤差の累積分布を示す。重み付け処理を行うことで、誤差が最大でも約2dB以下で測定できることがわかる。

このように、重み付け処理を行ない、 $T_{diff}$ が数100msec以内に制御できれば、移動側送信測定は基地側送信測定とおおよそ同じ精度で測定できる。

■屋外実験

図12に屋外実験系を示す。図7に示す室内実験系の伝搬シミュレータからの入力部をアンテナに置き換え、距離パルスを車軸からの入力としている以外は室内実験系と同一の構成としている。測定は都内虎ノ門付近の道路上で、800MHz帯の既存基地局の制御チャネルを受信することで行った。移動側送信測定では $\Delta T$ を1 sec、 $L$ を40mとしている。また、基地側送信測定では10cm間隔で400サンプリングした値を平均化している。図13は、測定誤差の累積分布を示す。なお、本測定では測定時間の約15%が停車していた。重み付け処理を行うことで、約2dB以下の誤差で測定できていることがわかる。また、 $T_{diff}$ が大きくなると誤差が増大することがわかる。屋外実験結果においても、室内実験結果と同様の傾向が得られ、移動側送信測定が有効であることが確認できた。

### 移動側送信・電界強度測定システム

移動側送信測定が基地側送信測定と同程度の精度が得られることが室内実験、および屋外実験で確認できた。そこで、基地側送信測定と同様に測定および操作が容易にできる移動側送信・電界強度測定システムを開発した。

移動側送信・電界強度測定システムは、図14に示すように移動側システム、基地側システム、およびそれらから得られるデータを処理するセンタ側システムで構成される。以下では、それらの構成、機能について説明する。

#### ■ 基地側システム

基地側システムは、図14に示すように電界強度測定器、遠隔制御部（モデム、携帯電話）および制御装置（PC）で構成される。ただし、時計はPC内蔵のものをしている。電界強度測定器としては、複数セクタを一台の装置で測定可能とするため、図15に示すように入力ポートを時分割的に切り換えて、その切換えと同期させて電界強度をサンプリングし、平均化処理できる電界強度測定器を開発し、サポートしている。この電界強度測定器は、1台で最大6入力ポートの測定が可能

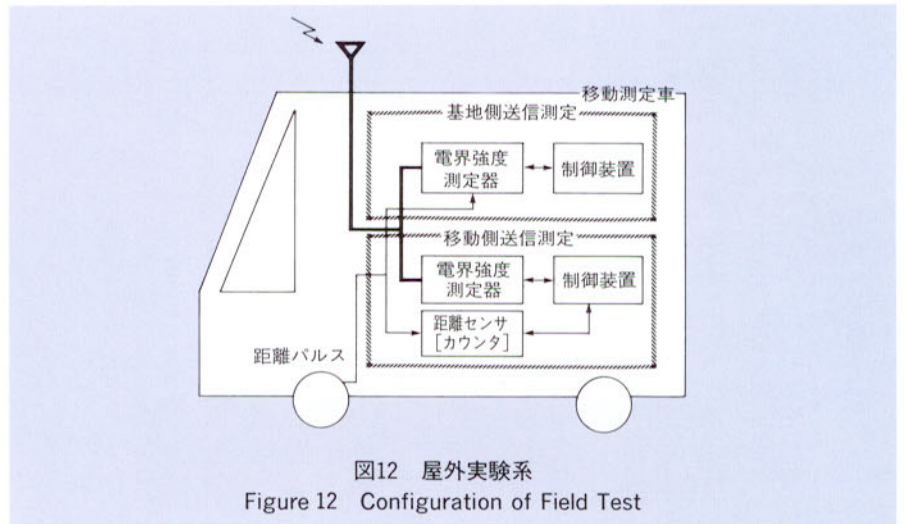


図12 屋外実験系  
Figure 12 Configuration of Field Test

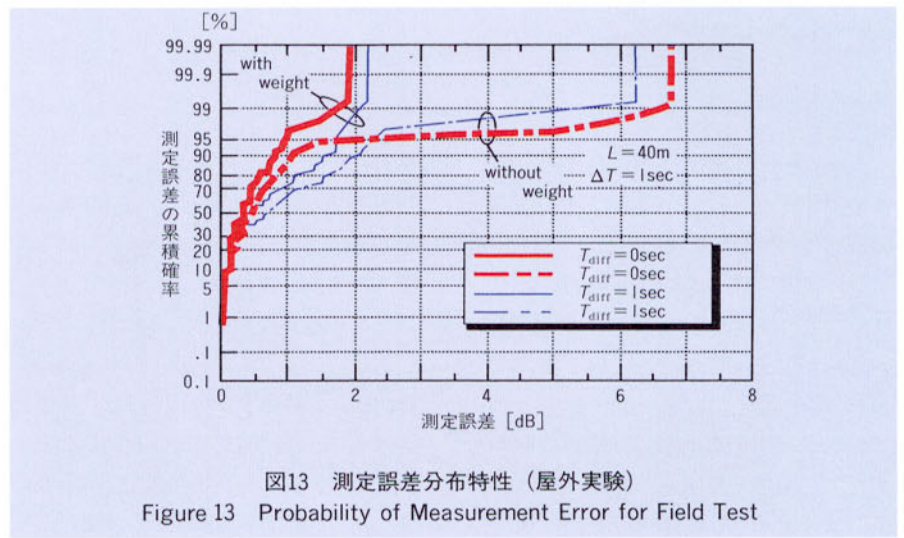


図13 測定誤差分布特性（屋外実験）  
Figure 13 Probability of Measurement Error for Field Test

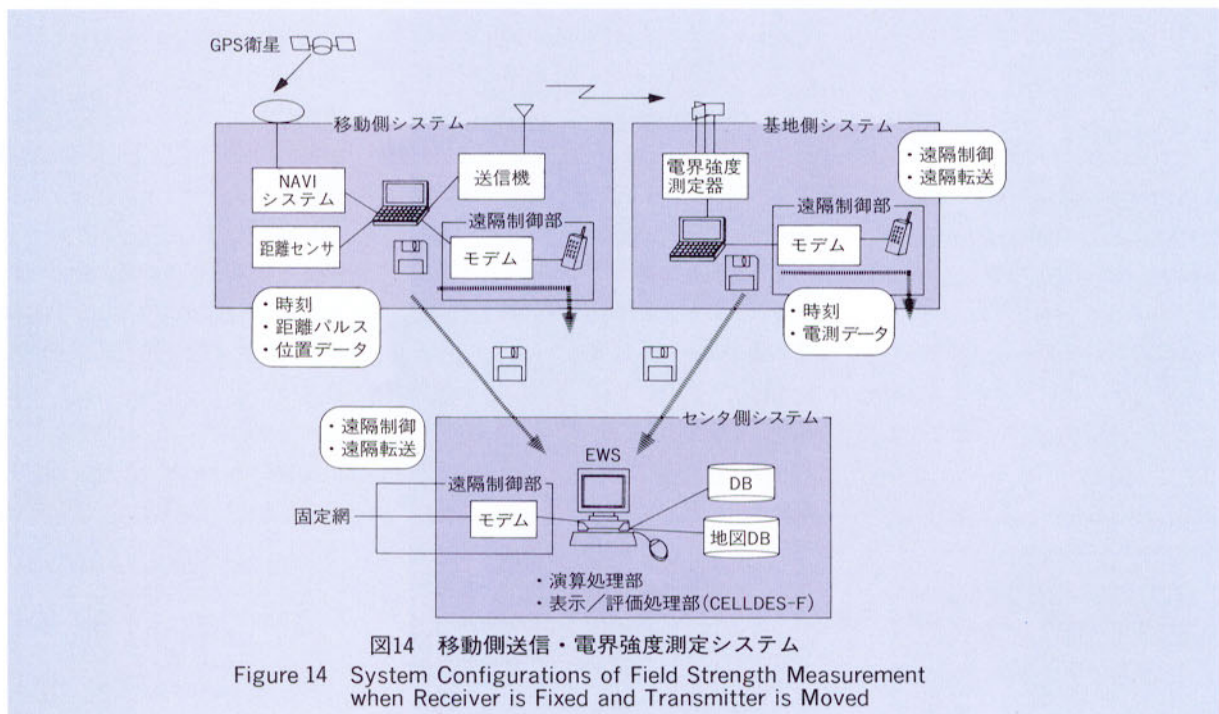


図14 移動側送信・電界強度測定システム  
Figure 14 System Configurations of Field Strength Measurement when Receiver is Fixed and Transmitter is Moved

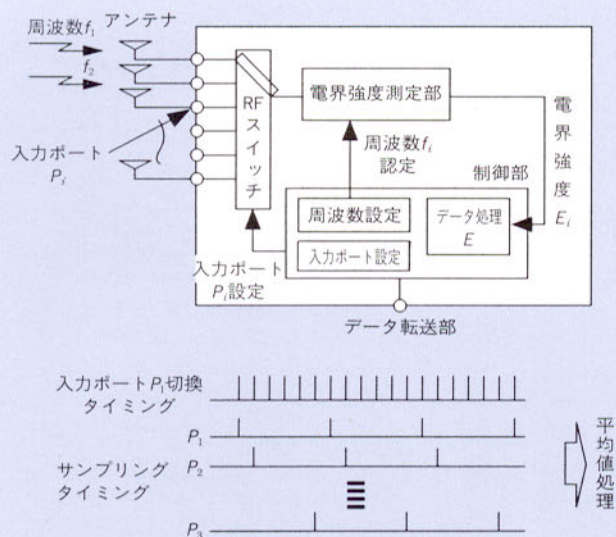


図15 電界強度測定器

Figure 15 Field Strength Measurement Equipment

であり、また800MHz/1.5GHzの両周波数帯で使用でき、レベル校正などの無調整化が図られている。

制御装置PCでは、時刻、時間間隔 $\Delta T$ ごとの電界強度を各入力ポートごとに記録する。測定結果はフロッピー、あるいは遠隔制御部を介してセンタ側システムへ転送する。特に、複数の基地局で同時測定する場合の省力化を考慮して、センタ側システムから測定の指示および測定データの転送などを遠隔で制御できる構成にしている。

#### ■移動側システム

移動側システムは、図14に示すように送信機、距離センサ、NAVIシステム、遠隔制御部(モデム、携帯電話)、制御装置(PC)で構成され、移動測定車内に搭載される。ただし、時計はPC内蔵のものをを用いている。また、NAVIシステムは、GPS受信機や光ファイバジャイロなどを用いたナビゲーションシステムを用いている<sup>11)</sup>。このため、高精度な位置情報が得られ、かつ情報が緯度、経度(絶対座標)で得られることから電子地図上への変換が容易となっている。

制御装置PCでは、時刻、距離パルス、位置座標を指定された時間間隔 $\Delta T$ ごとに記録する。測定結果はフロッピー、あるいは遠隔制御部を介してセンタ側シ

テムへ転送する。また、測定指示などは基地側システムと同様に遠隔で制御できる。

#### ■センタ側システム

センタ側システムは、移動側システムと基地側システムで取得した測定データを統合して処理する演算処理部、移動側システム、基地側システムを遠隔制御する遠隔制御部、演算処理部で処理した結果を表示、評価する表示/評価処理部で構成される。なお、センタ側システムはデータ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(Operation System)にUNIXを、GUI(Graphical User Interface)にOpen Windowを使用している。以下では、センタ側システムの特徴について述べる。

##### (1) 演算処理部

演算処理部では移動側送信測定で得た電界強度データを処理して、下り回線(基地局送信→移動局受信)で測定した電界強度に変換する。

まず、移動側システムと基地側システムで取得した測定データから(2)式に従って区間 $L$ ごとの電界強度を算出する。次に、その電界強度から各区間での伝搬損失を求める。そして、その値に下り回線の送信電力、フィーダ損失、アンテナ利得などを加算して、下り回線の電界強度

を算出する。なお、電界強度を算出するために必要なフィーダ損失、アンテナ利得などの基地局パラメータはあらかじめ基地局DBとして登録しているデータベースから選択する。

##### (2) 遠隔制御部

遠隔制御では、移動側システムと基地側システムに必要な測定パラメータ(例えば測定時間間隔 $\Delta T$ など)の転送、測定の開始、終了の指示、および測定データの転送を行う。

また、精度の高い測定を行うためには、基地側と移動側では一定時間内で時間同期を確立しなければならない(図10より時間同期誤差 $T_{diff}$ は数100msec内)。本システムでは、PC内蔵の時計を用いているため、恒常的な同期は取れない。そこで、遠隔制御機能を用いて基地側と移動側の時間同期を確立する。まず、センタ側システムと基地側システムまたは移動側システムと回線接続し、センタ側から時間パケットを送信する。この時間パケットを受信した基地側または移動側システムはそれに基づいて内蔵時計の時刻を校正する。この方法で数100msec内の時間同期を確立している。

##### (3) 表示/評価処理部

表示/評価処理部は、セル設計システムの実測データ処理部CELLDES-F(CELL Design System for Field data processing)の表示/評価処理部を用いている。したがって、演算処理部では最終的にはCELLDES-Fで処理できるデータフォーマットに変換する。参考として図16にCELLDES-Fのセンタ側機能構成を示す(各機能の詳細については参考文献6),7)を参照)。また、図17に移動側送信測定から算出した下り回線の電界強度(ここでは受信レベル)の表示例を示す。このように、移動側送信で測定した結果は従来の基地側送信測定と同様にCELLDES-Fを用いて容易に評価処理できる。

- 8) 花沢：“移動通信における電界強度測定処理の高能率化”，信学技報，CS79-201，1979.
- 9) 前田，藤井，中嶋：“移動通信における送信側移動時の受信レベル測定方法”，信学'95春大，B-362.
- 10) 佐藤，藤井：“移動通信における送信側移動時の受信レベル測定”，信学'96春大.
- 11) 例えば，石川，須賀，梅村，鈴木，“カーナビゲーションシステム”，National Technical Report, Vol. 40, No. 6, Dec. 1994.

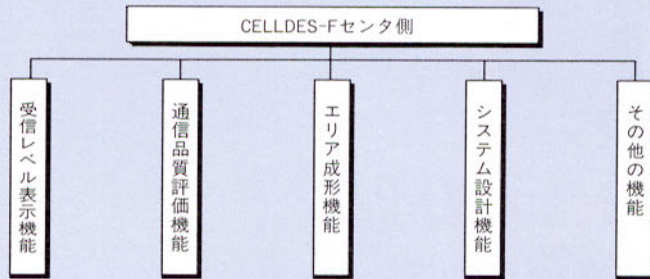


図16 CELLDES-Fセンタ側機能構成  
Figure 16 Main Function of CELLDES-F

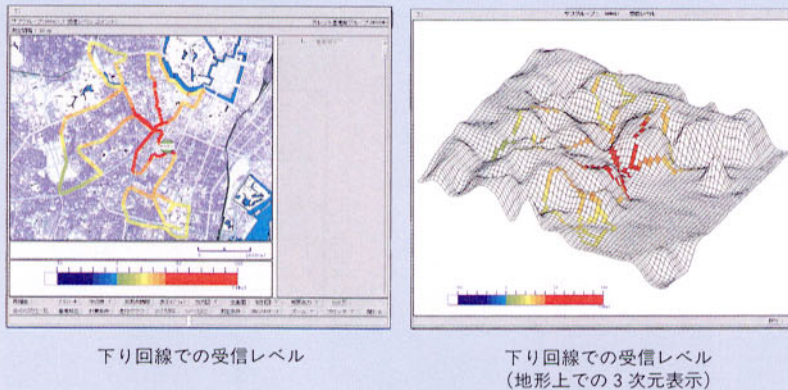


図17 受信レベル表示例  
Figure 17 Display Example of Measurement Level using CELLDES-F

## あ と が き

本稿では、移動側送信測定において基地側送信測定と同様に一定区間での電界強度を簡易に測定できる測定方法を提案し、その測定精度を明らかにした。また、この測定法を基ついた移動側送信・電界強度測定システムを開発したので、その概要を説明した。

本システムは、1つの送信機と1つの周波数で測定できるため、特に限られた周波数資源で複数の基地局を同時測定する場合には非常に有効な測定方法である。また基地側送信測定を対象として開発したセル設計システム実測データ処理部CELLDES-Fと完全に互換性が保たれているため、従来の基地側送信測定とまったく同様の評価処理ができる利点がある。

## 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”，1991信学秋季全大，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) 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, No4, Jan, 1995.
- 4) 花沢，服部：“移動通信における電波伝ばり測定値の処理方法について一適応型中央値処理一”，昭53信学全大391.
- 5) 桑原監修：“自動車電話”，2章，(社)電子通信学会 (1985).
- 6) 朝倉，佐藤，藤井：“実伝搬データを用いた移動通信セル設計システム”，信学技報，RCS95-131, 1996.
- 7) 朝倉，佐藤，藤井：“移動通信における実伝搬データを用いたセル設計システム—CELLDES-F—”，本誌，Vol. 4, No.1, Jan, 1996.