

電波伝搬の実際

明 山 哲

NTT アドバンステクノロジー(株)

〒180-0012 東京都武蔵野市緑町3 - 9 - 1 1

NTT 武蔵野研究開発センタ

Tel: +81-422-51-9811, Fax: +81-422-56-7676, akeyama@kana.ntt-at.co.jp

Abstract

When a circuit design engineer develops new equipment, in many cases, the target value of the specification of the circuits will be specified from a system designer. However, the circuit designer seldom has the chance to know how the specifications are determined. It is very important to decide the target of the specifications for the circuit designers, after understanding the view of a system design concepts. Then, the features of the application method will be introduced about the radio wave propagation characteristics which is one of the important parameters of a system design.

1. まえがき

従来通信機器の設計者は、通信システムの設計者からの指示に従って、回路パラメータを決定しているのが一般的である。しかし通信システムの設計者は万能ではなく、サービスイメージを実現するために最大限の努力はするものの、完成した通信システムが常に最高であるとは限らない。これは丁度同じオーケストラを指揮しながら指揮者により演奏会の品質に差が有ると同じである。この落差を少しでも少なくするためには、回路設計者もシステム設計の概要を理解している事が望まれる。そこで本資料では無線通信システム設計の基本となる電波伝搬について概説することにする。

電波伝搬特性を理解するためには、その基礎理論の理解が必要であるが、本資料では基礎理論についてはある程度は理解している技術者向けに、電波伝搬理論の応用として実際の伝搬路における伝搬特性の紹介と共に、それらの伝搬特性と無線通信システム設計との関連について紹介する。

2. 電波の性質

無線通信システムを設計しようとする場合には、先ず電波の性質を理解している事が必要である。これまでの無線通信システムは必ずしも無線通信サービスに最適な周波数帯が選択出来たわけではないが、それでも現在の無線通信サービスは図 2.1 に示す様に、電波の性質を上手に利用している事が分かる。

図 2.1 において、周波数が高くなるほど比帯域幅が広く取れるため、高速信号伝送に適している。しかし、10GHz を超える周波数帯では雨による電波の減衰が顕著になり、伝搬距離が数キロメートル以下としなければならない。例えば、20GHz 帯における無線中継システムの場合、伝搬距離は約 4km 程度であった(降雨マージン: 40dB)。しかし同じシステムでも雨の少ない国(例えば英国)では 90km 程度の伝搬距離でも利用出来る事が知られている。この様に伝搬距離が 10 倍も差がある場合には、システム設計の考え方も大きく変わり、アンテナの利得・送信電力・変調方式などの再調整が必要となる。即ち、経済的(効率的)な無線通信システムは、電波の性質を上手に利用する事により実現出来る。

3. 屋外伝搬路

屋外伝搬路では、電波は気象(電波気象)の変化に敏感である。大気の誘電率がわずかに 10^{-4} の変化をするだけで激しいフェージングが発生するが、ここでは基本的な伝搬損失の計算式の意味とミリ波帯で重要な降雨減衰について方式設計との関係において検討する。

3.1 伝搬損失の計算式の差異

屋外伝搬路において、サービスエリアの広さを評価する場合や同一周波数の繰返し利用のために干渉距離を計算する場合を例にして伝搬損失計算式の使い方について考えてみる。

例えば図 3.1 に示す様に、送信電力 1 W

(30dBm)で、送受信アンテナ利得が各 20dB、受信レベルを 20dB μ とした場合、受信機が宇宙空間に有る場合には、自由空間伝搬損失の計算式から 200km の伝搬距離になる。次に送受信アンテナが陸上に有る場合には地球の曲率の影響で球面回折伝搬損失を計算する事になり、伝搬距離は 20km となる。一方、受信機が市街地に有る場合には、奥村の市街地伝搬理論が利用出来、伝搬距離は 2km となる[1]。この他に平面大地伝搬理論を用いれば 40km となり、市街地伝搬理論でも坂上理論を用いれば 1.5km となる[2]。

この様に、使用する伝搬理論により伝搬距離に 100 倍以上もの差が生じてしまう。干渉許容距離「離隔距離あるいは協調距離」を計算する場合に、最悪ケースを想定して自由空間伝搬損失を用いて、図 3.1 に示す様に 200km 以上の距離が必要となる場合がある。しかしこれは相手が宇宙空間に存在する場合には良いのだが、陸上で用いる無線機間では最悪ケースでも球面回折理論を用いなければならない。そうすると離隔距離は 20km となり周波数利用率は格段に改善される。同様に市街地での利用なら 2km で良い事になる。即ち、離隔距離の決定も方式に適合した伝搬モデルを用いる必要がある。

補足として球面回折理論を適用して離隔距離を決める場合には、図 3.2 に示す様に有る距離からは対流圏散乱や降雨散乱などにより思ったほどにレベルが低下しない事も理解しておく必要がある[2]。

伝搬理論の利用の仕方に関連し、例えば図 3.3 に示す様に高さが 10~20m と揃った樹木が連なる伝搬路に 8m 程度の高さにアンテナを設置した場合のレベル計算にはどの伝搬理論を利用するのだろうか。一般的には樹木を建物と同じ障害物と考えて奥村の市街地伝搬理論の適用を考える。即ち地上高 2m の受信レベルを計算し、アンテナ高補正で受信レベルを計算する事になる。しかしこの方法は樹木と建物とは回折損失や反射損失などにおいて異なり危険が存在する。そこで、考え方を逆転して、樹木のトップでは自由空間値となることから、樹木トップから下方向に高さ補正值を測定して受信レベルを計算する事にする。この方法は樹木の高さに係らず相対的なアンテナ高補正で対応出来るためとても有効である。

この様に伝搬損失の計算には伝搬路の状況に応じた計算式の修正や新たな開発も必要である。また回路設計や方式設計の遣り繰りで吸収できないレベル不足が存在する場合には、サービスイメージを修正し、それに対応した伝搬計算式を新たに作り直す事もある。

3.2 周波数による差異

新しい通信方式をどの周波数帯で構築するかを検討する場合を考えてみる。例えば 5GHz 帯のマイクロ波中継方式に相当する通信方式を 20GHz 帯や 60GHz 帯で実現しようとする。

5GHz 帯の場合には中継距離は 50km であり、フェージングマージンは 40dB ほど確保しているとす。20GHz 帯では伝搬損失が 12dB 増加するだけではなく、降雨減衰によりさらに 500dB も余計にマージンを取る必要がある。但しこれも降雨による瞬断を年間 5 分 (0.001%) を仮定しているからであり、これを IP 系の回線と考えて即時性を少し犠牲にして許容瞬断時間を 50 分にすれば 340dB と小さくなるが、それでも降雨減衰マージンが大きすぎて実用化は難しい。これが 60GHz 帯になると 5GHz 帯に比べて伝搬損失が 22dB 増加し、降雨マージンは 1600dB となり、さらに大気ガスによる減衰として 800dB が加わり、フェージングマージンは天文学的な数値となる。

この様に周波数帯により伝搬損失に寄与する現象が変化するので、実現出来る通信方式もそれぞれ特徴の有るものになる。但し、ここでの検討は極論であり、降雨強度 100mm/hr の雨が 50km に渡り一様に存在する事は例え台風の時でも考えられない(雨域の広さは数 km 程度)ので、実際の降雨減衰マージンは数 10dB 程度になると考えられる。

電波気象と密接に関連している伝搬特性には地域差があるから、雨の少ない地域では 20GHz 帯で 50km の回線設計も可能である。我が国の様に雨の多い地域ではミリ波帯を利用しようとする数キロメートル程度の近距離回線ならば技術的に実現可能となるが、無線局数が増加する分回路設計者には過酷なまでの装置のコストダウンが要求される事になる。

3.3 降水減衰

10GHz を超える周波数帯では降水(降雨と降雪)による減衰が無視出来ない。図 3.4 は日本における平均的な降雨強度の累積分布である[2]。この図から降雨強度の年間の 0.001%値が約 100mm/hr で有る事が分かる。しかし、近年になり大都市では従来と異なる気象現象が多発しており、2000 年 8 月には大手町で 1 時間に 82.5mm、2001 年 7 月には練馬で 1 時間に 131mm の降雨をそれぞれ観測している。降雨強度は 1 時間の中で変動はしているが、平均的に 100mm/hr の強い雨が 1 時間継続していたと考える事が出来る。現在ではこれが 30 年に一度の特異現象とはもはや言えない状況となっている。このため、大都市部における降雨強度分布については見直しの時期になっており、改めて研究が進められている[3]。

幸いこの様に強い降雨に関しては、雨域の大きさが狭い事もあり、ミリ波無線回線をメッシュ状に構築する事により、通信断の時間を経路切替によるダイバーシチ効果を利用し軽減し、回路設計への負担を少なくする事が検討されている[4]。

降雨減衰に関連して注意しなければならないことに、アンテナ鏡面や一次放射器への着雪や

水滴付着による伝搬損失の増加である。降雪による減衰は降雨減衰に比べて小さいので回線設計では無視されているが、アンテナ鏡面やレドームへの着雪は無視出来ない。例えば 60GHz 帯における測定結果によれば、着雪の厚さ x_1 [cm] と透過減衰量 y_1 [dB] との間に、

$$y_1 = 0.85x_1 - 0.95 \quad (3.1)$$

の関係が得られている[5]。

4. 屋内伝搬

屋内伝搬路に限定すると、伝搬距離が短いため電波気象の影響は少ないが、人工的な建築物の影響で伝搬特性が大きく左右される。そこで、屋内における基本的な伝搬損失の計算方法やその計算に必要な建材の電気特性について検討する。

4.1 伝搬損失

屋内伝搬路は建物毎に部屋の広さや壁などの材質が異なるため極めて複雑である。このためサービスエリアを計算する場合には、図 4.1 に示す様なシミュレーションが有効である。しかし部屋毎に計算しては干渉計算を含む置局設計を行う場合には試行錯誤の繰返しであるから、膨大な時間が掛かることになる。そこで、細かな事は無視して、屋内一般的な伝搬損失の計算式が ITU-R P1238 として提案されている。

$$L_{total} = 20 \log f + N \log d + L_f(n) - 28 \quad (4.1)$$

但し、 L_{total} は dB 値で表した伝搬損失、 N は距離依存性を示すパラメータ、 f は周波数 [MHz]、 d は伝搬距離 [m]、 L_f は dB 値で表した床の透過損失、 n は伝搬路内の床の数であり、それぞれの値は表 4.1 に示すようになっている。

式 4.1 は見通しの有無に係らず平均的な伝搬損失を計算する式であり、利便性は大きい。しかし壁面の材質などの考慮がなされていないので、もう少し現実的な計算式も提案されている[6]。

$$L_{total} = f(d) + \sum_{i=1}^n A_i \quad (4.2)$$

但し、 $f(d)$ は伝搬距離 d における自由空間伝搬損失、 A_i は伝搬路内に存在する障害物の透過損失 [dB] の総和を示している。

式 4.2 は伝搬路内に存在する壁面ばかりでなく、什器類や樹木などの透過損失を含める事が出来るために使い勝手が良い式である。例えば、無線 LAN のアクセスポイント AP を追加設置をする様な場合に、他の AP から同一 CH の干渉波が存在して D/U > 20dB が確保出来ない場合などに、干渉波が到来する方向に適切透過損失を持つ什

器を配置するなどの対応の指針が容易に得られる。しかし伝搬路に直接波よりも強勢な反射波が存在するような伝搬路では使い方に注意が必要である。

屋外伝搬路に無い屋内伝搬路の特徴の一つとして、廊下やトンネルの様な伝搬路では通路が導波管と同じような振る舞いをする事である[1]。このため伝搬損失は自由空間伝搬損失で計算した値よりも小さくなる場合がある。また逆にある距離からは見通しが有るにも係らず急に減衰が大きくなる場合がある。さらに、廊下などで金属構造物が天井裏などに張り巡らされている場合には廊下がフィルターの様な効果を表すこともあり、特定の周波数だけ特異な伝搬特性を示す場合も有る[7]。

4.2 建材などの透過・反射損失

式 4.2 を利用して伝搬損失を計算する場合には什器や壁面材料の電気特性が必要になる。一般的には壁面材料などの複素誘電率が与えられれば透過損失や反射損失を計算する事が出来る。複素誘電率の測定には図 4.2 に示す様な装置で反射損失と透過損失の角度特性を測定し、例えば ITU-R P1238-3 に示されている厚みの有る材料の透過・反射係数の計算式を利用して複素誘電率を求めている[8]。しかしこの測定方法は平板状の資料に関しては有効であるが、什器類の様な複雑な形状をした物には使えない。そこで、直接的に透過・反射損失を実測する事も行われている。

表 4.2、表 4.3 は複素誘電率から計算した透過損失と反射損失の例である。また表 4.4 は什器の透過損失を実測した値である[9]。

5. 干渉波

無線通信システムを設計する場合に、受信レベルと共に干渉波レベルも重要な検討課題である。干渉波には同一周波数を利用する他システムからの干渉とマルチパス（ダクト伝搬や多重反射などで発生する）による干渉が存在する。

デジタル無線通信システムにおいて、他システムからの干渉波レベルに関しては、熱雑音と同じ扱いが出来るので、D/U の変動分布を測定する事で回線設計が可能である。一方、マルチパス干渉については伝送波形が歪む事により符号誤り率が劣化するため、伝搬上では特別な扱いをしている。さらにマルチパスによる符号誤り率に関しては固定マイクロ波無線中継システムと移動通信システムとは異なる扱いをしている。

5.1 帯域内偏差

固定無線通信システムで多重波干渉が発生する原因はフェージングによるものが主である。

伝搬距離 50 km の中継回線において、海面などからの正規反射波が存在しない場合には多重波の通路長差は 1m 以下と言われている。このため、レイリーフェージングが発生した場合の伝送帯域内に生じる周波数特性は最悪でもノッチ間隔が 300MHz 程度であるため、帯域内にノッチが 1 つ出来る程度であり、通常は帯域両端における受信レベル差(帯域内偏差)は数 dB 程度である。

このため、マルチパスの程度を評価する方法として、この帯域内偏差を用いるのが一般的である。例えば帯域内偏差が 2dB では符号誤り率が 10^{-5} 、4dB では 10^{-3} 程度になる事が報告されている[10]。

5.2 遅延スプレッド

移動通信システムにおいてマルチパスが発生する原因は反射波によるものが主である。このため伝搬距離が数 km 程度であっても、反射波としては数 km ~ 数 10km のものも存在する。この様に長遅延波が存在すると、ノッチ間隔は 100kHz 程度となり帯域内に複数のノッチが存在する場合もある。このため、固定マイクロ通信で用いている帯域内偏差を使う事が出来ず、新たに遅延スプレッドの概念が提案された。

これまでの研究で遅延スプレッドは比較的使いやすいパラメータである事が知られており、移動通信システムには広く使われている。このパラメータの利点は近似的に変調方式にかかわらず遅延スプレッドと符号誤り率との関係が存在する事である[1]。表 5.1 は各種の場所で測定した遅延スプレッドの値であり、屋内に比べて屋外は 10 倍程度遅延スプレッドが大きい事が分かる。

遅延スプレッドのイメージは少し分かり辛いので、等振幅の 2 波干渉の場合について見ると、通路長差が 2 μ 秒 (600m) の場合の遅延スプレッドは 1 μ 秒となるので、これで反射波の様子をイメージすると分かり易い。

また主波と遅延波との時間差が符号長の 10% 程度になると誤り率が 10^{-3} 程度でフロア状、即ち送信電力をいかに大きくしても D/U が変化しないため誤り率は改善されなくなる。また遅延時間差が極端に大きくなり符号長を超える様になると、符号誤り率は主波と遅延波との D/U で評価する方が遅延スプレッドを用いるより有効である事が提案されている。

なおこの遅延スプレッドを軽減する方法として、アンテナの指向性を利用する方法や携帯電話方式や固定マイクロ波方式で用いられている遅延等化器を用いる方法があるが、OFDM の様に個々の伝送帯域幅を狭くして遅延波の影響を軽減する方法もある。これらの方法は電波伝搬のメカニズムを巧妙に利用した技術であり、今後も伝搬メカニズムを理解した回路設計者や方式設計者からの新しい提案が期待される。

5.3 市街地の多重波伝搬

受信アンテナに到来する多重波のモデルとしては、アンテナの全周囲から一様に到来するモデルが提案されている。しかし実際に多重波の到来状況を測定して見ると図 5.1 に示す様になっている[1]。図においてドプラーシフトは電波の到来方向を示しているため、自動車の後方から 8 μ 秒 (2.4km) という遅延波が到来している状況が分かる。

図 5.1 から分かる事は、一般にアンテナの指向性を鋭くする事により、受信する多重波の数を減らす事が出来るため遅延スプレッドを小さくする事が出来るが、市街地では指向性アンテナの向きによってはそれほどの改善効果が得られない場合がある。

レベルの高い多重波は遅延時間が小さく、受信アンテナのほぼ全周囲から到来している。このため、受信アンテナに指向性アンテナを用いてもアンテナの利得ほどには受信レベルが高くない。見通しの無い場所(多重波環境)での測定結果によれば、ダイポールアンテナの受信レベルを基準とした場合に、3 素子スリーブアンテナで 2dB、5 素子八木アンテナで 0.2dB、12 素子八木アンテナで 2dB のいわゆる実効利得がそれぞれ測定されている。即ち、多重波環境ではアンテナ単体の利得は保存されず、実際の受信レベルはアンテナによりそれほど変化しないと言える。但し、多重波の垂直面方向の到来角度はそれほど広くないため、アンテナの垂直面の指向性を鋭くする事は実効利得を高くするのに有効である。

6. レベル変動

無線通信回線で発生するレベル変動は種々の要因で発生するのでその概要を以下に示す。なおダイバーシチスイッチなどの回路設計においては、フェージングの変化速度が約 100dB/秒と高速であることを理解して設計する必要がある。

6.1 固定無線通信回線

固定無線通信回線におけるレベル変動にはラジオダクト内で発生する多重波干渉によるフェージングあるいはシンチレーションと降雨などによる減衰とが存在する[2]。

フェージングの場合には変動周期が数秒程度でレベル変動幅は 30dB 程度にもなる。また干渉する波の数により受信レベルが定常値よりも 10dB 以上高くなる場合も有り、レベル変動分布はレイリー分布となる。

シンチレーションは低仰角の衛星通信などで大気揺らぎにより発生し、変動幅は 11GHz 帯では最大で 10dBpp 程度にもなる。

降雨減衰は降雨強度に比例するため、フェージングに比べて変動はゆっくりであり変動分布

はガンマ分布で近似できる。

6.2 移動無線通信回線

移動伝搬路のフェージングはアンテナ周囲の建物の壁面などからの反射波の干渉で発生する。このため、送受信アンテナ間に見通しの無い伝搬路におけるレベル変動分布はレイリー分布をする。一方、送受信アンテナ間に見通しが有る場合には直接波のレベルと反射波のレベルとに差異があるため、レベル変動分布は仲上ライス分布になる。比較的開けた場所では、仲上ライス分布のパラメータは7dB程度となる[1]。

フェージングの変動速度は周波数と受信機の移動速度により変化する。例えば周波数1GHzで時速60kmで走行する自動車では約40Hzのレベル変動速度となる。

6.3 人の移動による遮蔽損失変動

移動伝搬路は伝搬路高が低いため、車両や人により見通しが遮られる事もある。ここでは無線LANなどの屋内利用を想定し、人の移動による伝搬路の遮断について検討する[11]。オフィス環境に伝搬路長が数メートル程度の回線が存在する場合、その伝搬路を人が単位時間内に横切回数 N は簡単に次式で求められる。

$$N = 260 \times D_p \quad (6.1)$$

ここで D_p は $1m^2$ あたりの平均人数であり、 $0.05 \leq D_p \leq 0.08$ の範囲内で有効である。また伝搬路を横切る事によるレベル低下量が10dB, 20dB, 30dBの場合、その平均継続時間 T_s はそれぞれ0.52秒, 0.25秒, 0.09秒となる。これより1時間のうちのトータルの瞬断時間 T は $T = T_s \times N$ で計算する事が出来る。

なお図6.1は瞬断回数の測定例であるが、オフィスと展示場とでは瞬断回数の傾向が異なる。これは、オフィスでは歩いている人より机に座って仕事をしている人の割合が多いが、展示場では殆どの人が移動しているためと考えられる。このため、屋内環境により瞬断回数と人口密度との関係を今後より詳細に求める必要が有る。

7. まとめ

屋外および屋内伝搬路における電波伝搬特性について、回路設計と関連の深い方式設計との係り方と言う観点から紹介した。ここで紹介した伝搬特性は現在解明されている伝搬技術のうちのほんの一部分に過ぎないが、今後回路設計パラメータを決定する際に、システム開発への貢献度とリスクのバランスのとり方において、方式設計や伝搬推定精度などの現状も踏まえて決定される事を期待する。

謝辞

この資料を纏めるにあたり、東工大の高田潤一先生のご指導を受けました。またミリ波伝搬に関しましては、YRP共同研究のミリ波AdHoc通信システムの成果を利用させて頂きました。ここに関係者の方々に深謝致します。

引用文献

- [1] 進士昌明編著, “無線通信の電波伝搬” 電子情報通信学会, 1993.6.
- [2] 細矢良雄監修, “電波伝搬ハンドブック” リアライズ社, 1999.1.
- [3] 吉川誠, 他, “広帯域ミリ波無線アクセスシステムの開発 (3) 降雨時伝搬特性の検討”, 信学総大, B-5-326, 2002.3.
- [4] 塚本勝俊, 他, “ギガビットミリ波無線アクセスシステムの開発(II) - (1) システムの概要”, 信学総大, B-5-292, 2004.3.
- [5] 金澤亜美, 他, “ミリ波縦系配線システムの概要および積雪時の影響に関する報告”, 信学総大, SA-9-2, 2004.3.
- [6] 明山 哲, “屋内環境におけるミリ波伝搬特性”, 信学ソサエティー大会, SC-8-6, 2003.9.
- [7] 加地正毅, “UHF帯における屋内及び低アンテナ基地局屋外電波伝搬に関する研究”, 学位論文, 1989.9.
- [8] 金澤亜美, 他, “ミリ波帯(62GHz, 70GHz)における建材の反射特性の測定”, 信学論, vol.J87-B, no.3, 2004.3.
- [9] A.Akeyama, et. Al., “Study on mm wave propagation characteristics to realize WPANs: 15-04-0094-00 mmwi tutorial study on mm wave propagation characteristics to realize wpans”, IEEE802.15.SG3C, 2004.3.
- [10] S.Komaki et. al., “Characteristics of a High Capacity 16 QAM Digital Radio System in Multipath Fading”, IEEE Trans.COM, vol.COM-27, no.12, 1979.12.
- [11] F.Ohkubo, et. Al., “Millimeter-Wave Ad Hoc Wireless Access System - (7) A Study on Fade Duration in Exhibition Halls-”, TSMW2004, P-26, 2004.3.

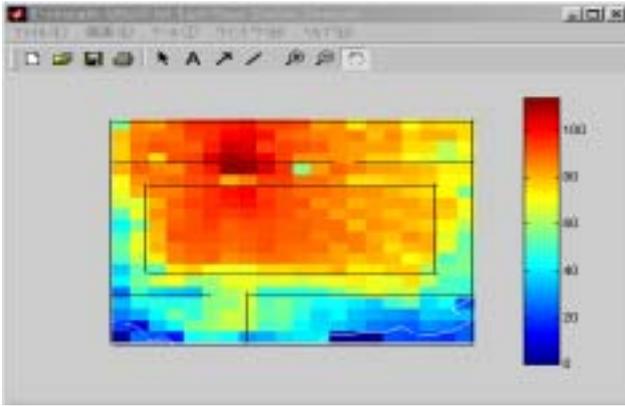


図 4.1 屋内伝搬特性の計算例

表 4.1 パラメータの周波数特性

| 周波数 f | N | L f |
|--------------|-----|--------------|
| 1.8-2.0GHz z | 30 | |
| 4GHz z | 28 | 15+4(n-1) |
| 5.2GHz z | 31 | 16 (1 floor) |
| 60GHz z | 22 | |
| 60GHz z | 20* | *実測値 |

表 4.3 反射損失の計算値

| | 2.4GHz z | 5.0GHz z |
|-------------------|----------|----------|
| ガラス (厚さ 10mm) | | |
| フロート板ガラス | 3.7 dB | 5.9 dB |
| ソーダ石灰ガラス | 2.8 | 8.9 |
| 珪酸ソーダガラス | 4.3 | 5.3 |
| 熔融石英ガラス | 5.8 | 5.4 |
| コンクリート (厚さ 7.5cm) | | |
| 打ち込み 1 週間後 | 5.8 | 6.7 |
| 打ち込み 5 週間後 | 9.8 | 6.6 |
| モルタル (厚さ 7.5cm) | 9.2 | 8.3 |
| 天井材 (厚さ 9mm) | 18.7 | 14.1 |

表 4.4 什器の透過損失の測定例 (60GHz)

| 家具 | 空状態 | 収納状態 |
|--------|---------|---------|
| 洋服ダンス | 12.1 dB | 25.9 dB |
| ハンガー | 0.7 | 10.8 |
| 本箱 | 7.3 | 28.6 |
| TV セット | | 22.9 |

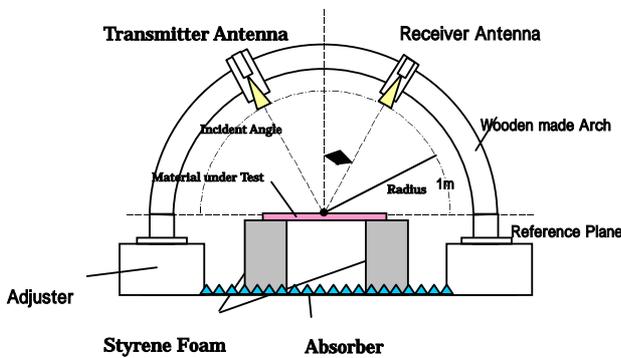


図 4.2 反射・透過係数の測定装置構成

表 4.2 透過損失の計算例

| | 2.4GHz z | 5.0GHz z |
|-------------------|----------|----------|
| ガラス (厚さ 10mm) | | |
| フロート板ガラス | 2.7 dB | 1.6 dB |
| ソーダ石灰ガラス | 3.6 | 1.3 |
| 珪酸ソーダガラス | 2.1 | 1.6 |
| 熔融石英ガラス | 1.3 | 1.5 |
| コンクリート (厚さ 7.5cm) | | |
| 打ち込み 1 週間後 | 9.9 | 17.8 |
| 打ち込み 5 週間後 | 5.9 | 11.5 |
| モルタル (厚さ 7.5cm) | 6.3 | 12.1 |
| 天井材 (厚さ 9mm) | 0.14 | 0.33 |

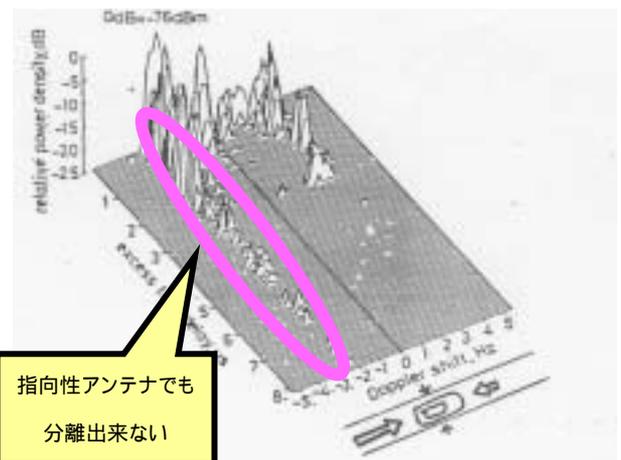


図 5.1 市街地における多重波の到来状況

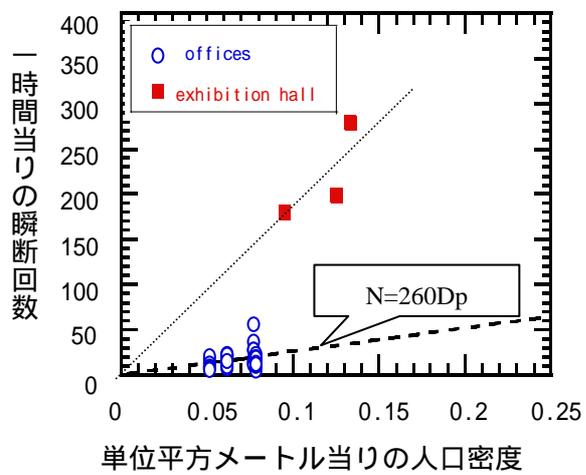


図 6.1 人口密度と瞬断回数の関係