

## 第6章 提案するコードマルチパス誤差削減手法

本章では、本研究で提案するコードマルチパス誤差（以下、マルチパス誤差）低減技術についてまとめた。まず、問題となっているマルチパスの影響を調べるために、あらかじめ決めた場所で GPS の生データを取得しマルチパスの影響を調査した。次にマルチパス対策用コリレータを簡易的に開発するために、独自で開発したマルチパス誤差推定シミュレーションについて紹介する。すでに第5章で、現存するマルチパス対策用コリレータ技術については述べたので、ここではその結果も利用している。次に本研究で提案するマルチパス対策技術を紹介する。第5章で示したように、マルチパス波の直接波に対する遅延距離が 30m 程度以上の信号に対しては、すでにそのマルチパス誤差を大幅に削減できることが知られている。ゆえに、本章では特に遅延距離の短いマルチパス波による誤差の削減を目的とした。大きく分けて2通りの手法を考案した。1つ目は、信号強度や擬似距離そして搬送波位相といった、GPS の生データの変動を利用して誤差を増大させるマルチパス波を検出し防ぐものである。2つ目は、生の相関波形の値を利用することによるマルチパス誤差低減手法である。今回提案した手法が、どの程度の効果を発揮するかを、シミュレーションと実環境でチェックしたので報告する。

## 6. 1 実環境におけるマルチパスの状況

### 6. 1. 1 マルチパスの評価手法

ここでは、実環境におけるマルチパスの状況の評価手法について述べる。以下の節において、実際にGPSアンテナをいくつかの場所に設置し、必要な生データを取得するが、その生データのうち、マルチパスの評価のために以下の情報を利用することにした。ただし全てを利用することはなく、環境に応じて適した情報を選択した。

1	擬似距離と搬送波位相の差分値 (cc-difference値)
2	信号強度
3	可視衛星数
4	マルチコリレータによる相関値
5	アンテナ周辺の地図データと衛星の仰角、方位角

ここで、1の擬似距離と搬送波位相値の差分値は、コードのマルチパス誤差を評価するために頻繁に利用される値である。基本的に、搬送波位相がマルチパスの影響をほとんど受けない (L1帯で最大でも約4.8cm) ことを利用した技術である。単純に擬似距離と搬送波位相値の差分をとっただけでは、マルチパス誤差やノイズ以外に電離層遅延の影響が残存するが、2周波のデータを利用することにより電離層遅延の影響を排除している。2の信号強度はマルチパス誤差と時間方向、振幅方向の両方に関して強い相関を持つことが知られており、十分に利用できると考えられる。可視衛星数は、取得状況の概要を知るために用いた。マルチコリレータによる相関値は、中心ポイントの値が信号強度に相当することと、大きなマルチパス波の遅延距離を見分けることが容易であることから利用した。さらにアンテナ周辺の地図データと衛星の仰角、方位角情報は、アンテナと衛星の幾何学的配置を知る上で非常に有効であるので用いた。ただし、3D地図の精度は不明 (場所にもよるが水平誤差は5m未満程度) で、特に高さ方向は実物とは全く一致していない。

マルチパスの評価を行うために、以下のように大きく分類を行った。

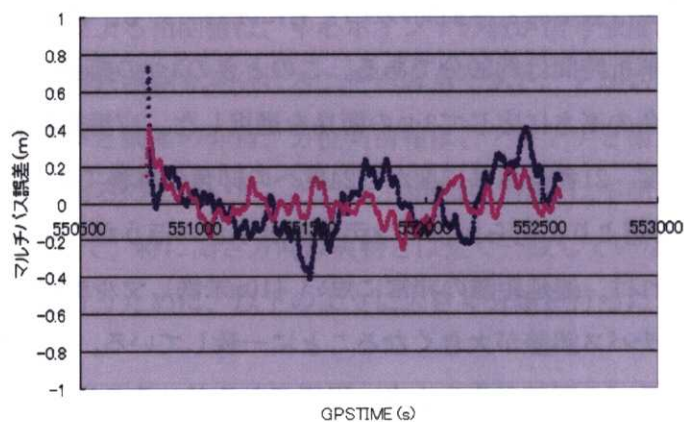
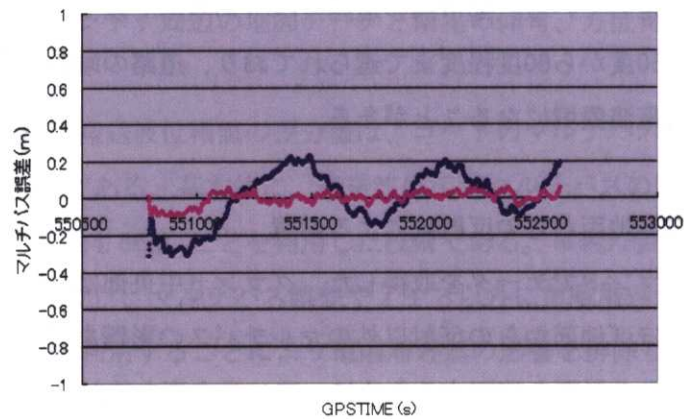
1	直接波と地面からの反射波による環境
2	直接波と上方からの反射波による環境
3	反射波と直接波の回折による環境

ここで、1は周囲が開けており、基本的にアンテナ上方（仰角10度程度以上）では、反射波が入射されない理想的な環境を意味している。具体的には、基準局のアンテナを屋上や広場に設置する場合、ナビゲーション用のアンテナを飛行機の上部や船の最上部に設置する場合はこのような状況である。2は一般的な使用で最も頻繁に起こる現象である。直接波が届いているが、さらに障害物により反射したマルチパス波が入射される環境である。受信機内部のマルチパス対策技術の性能にもよるが、数10m以内の近距離に大きな障害物がある場合、非常に大きなマルチパス誤差を生じる可能性は高い。逆に言えば、それほど大きな障害物がアンテナ周辺になければ、それほど大きなマルチパス誤差を生じることはない。以下では、大きなマルチパス誤差を生じる場合について評価している。3は都市部や建物の並んだ非常に狭い道路等において起こる状況である。直接波の視線方向は障害物に遮られており、アンテナに届くものは回折されたものである。この回折された直接波に、反射波が加わった場合を想定している。都市部の道路では、10階建て以上のビルが多いため、道路の両側ともに仰角50度から60度程度まで遮られており、道路の端のほうにアンテナがある場合、このような電波環境になることがある。

### 6. 1. 2 直接波と地面からの反射波による環境

東京海洋大学のグラウンドでデータを取得した。グラウンド中央部は、仰角20度以上程度は十分に開けており、ほぼ地面からの反射以外のマルチパスの影響を受けていないと考えられる。地面からの高さの影響を確認するために、アンテナ高を約2mにした場合と20cmにした場合でデータを同時に取得した。双方のアンテナの影響を避けるために、20m程度離して設置した。使用受信機は基準局と移動局の2つともOEM3である。移動局のアンテナは双方ともGPS600である。解析時間は約30分である。このときの3つの衛星のcc-difference値を図6. 1に示す。仰角の高さに応じて3つの衛星を選択した。17番衛星は71度から56度、8番衛星は39度から30度、21番衛星は13度から24度への仰角の推移であった。17番衛星と8番衛星のcc-difference値より、明らかにアンテナ高が小さいほうが、マルチパス誤差が小さいことがわかる。これは、遅延距離の非常に短い（10m未満）マルチパスにおいて、遅延距離が伸びるほどマルチパス誤差が大きくなることに一致している。21番衛星は20cm高のアンテナのほうのマルチパス誤差がやや小さい程度であるが、その傾向は見られる。仰角に応じてマルチパス誤差に違いが見られるのは、遅延距離とともに、マルチパス波の振幅の違いによるものである。直接波に対するマルチパス波の振幅が大きい（1に近づくほど）ほど、マルチパス誤差が大きくなることは既知である。基本的に地面に反射しているので、反射係数は仰角に少し依存する程度であるが、アンテナのパターンによる減衰効果も仰角

が高くなるほど大きくなることがわかっている（仰角が高くなると、反射波はアンテナのより真下から入射されることになり、アンテナパターンから真下方向の入射波はかなり減衰されている）。これらの理由と、仰角が低い場合は、グラウンドにおいても、電灯や木の影響をどうしても避けることができないことから、21番衛星のマルチパス誤差がどちらの場合も大きくなっていると予想される。図6. 2に、アンテナ高の違いによるDGPS測位結果を示す。マルチパス誤差の影響の違いにより、水平方向の2drmsで15cm以上の差が見られる。以上のことから、周囲が開かれて、障害物が極端に少ない環境では、アンテナ高を地面に対して低くすればするほど、マルチパス誤差も削減され、測位結果も改善されることがわかる。これは地面をアンテナのグラウンドプレーンとして活用した効果によるものであるといえる。さらに周囲が開かれた環境では、DGPSの水平方向の誤差（2drms）で50cm程度を得ることは困難ではないことがわかった。



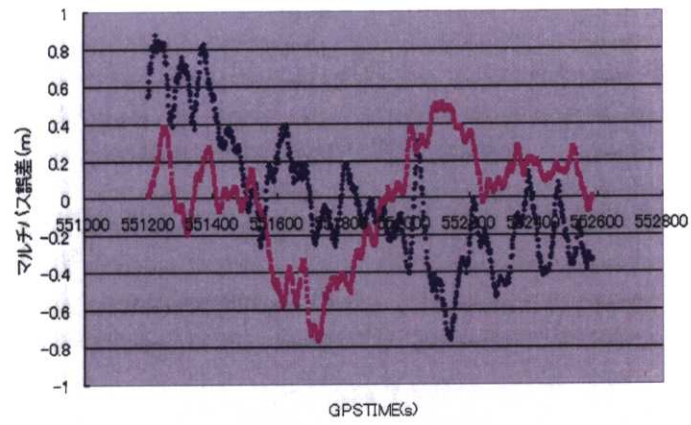


図6. 1 各衛星のcc-difference値（上から17番、8番、21番衛星）

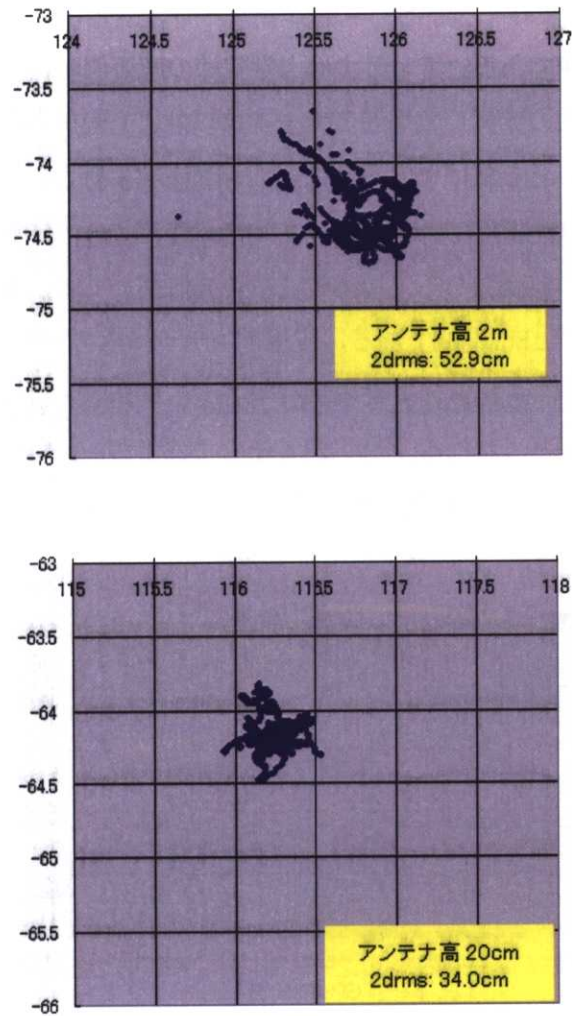


図6. 2 DGPS測位結果（上がアンテナ高2m、下が20cm）

6. 1. 3 直接波と上方からの反射波による環境

東京海洋大学の大学院棟の横でデータを取得した。図 6. 3 に取得場所の水平図を示す。

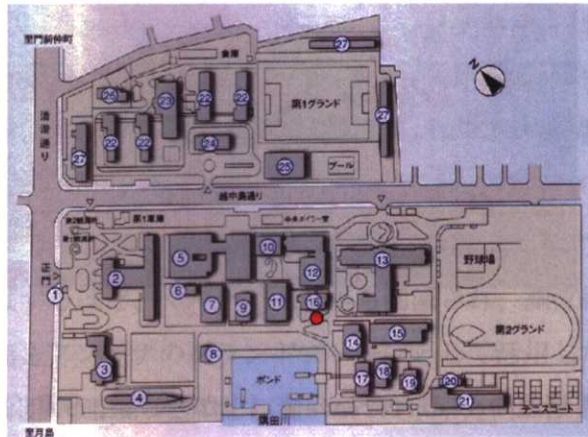
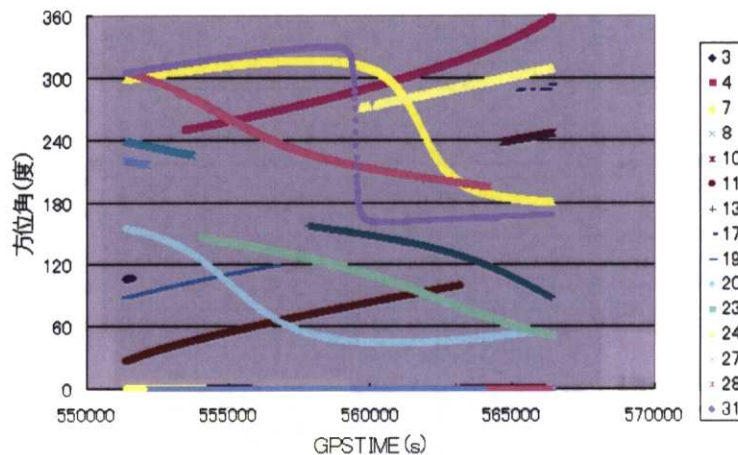


図 6. 3 取得場所の水平図（東京海洋大学越中島校舎）

上図の 16 番が大学院棟である。アンテナは大学院棟の南西側の道路に、壁よりちょうど 8 m 離して設置した（上図の赤丸）。周囲は大学院棟以外にも建物が並んでいるが、大学院棟の南西側にはポンドがあるだけで、それほど大きな障害物はない。アンテナに面した方向の大学院棟の大きさは、横が 25m 程度、高さが 35m 程度であり、比較的突起物の少ないガラスとコンクリートの表面である。取得時間は約 5 時間である。使用した受信機は基準局が OEM4、移動局が OEM4 と EURO-3M である。使用アンテナは双方ともに GPS702 である。取得時間帯の仰角、方位角情報を図 6. 4 に示す。ここで、仰角と方位角の情報より、大学院棟の壁に反射されていると思われる、7 番、24 番そして 28 番の 3 つの衛星を選択した。図 6. 5 に選択した衛星の cc-difference 値をそれぞれ示す。全て 0 平均化されている。



第6章 提案するコードマルチパス誤差削減手法

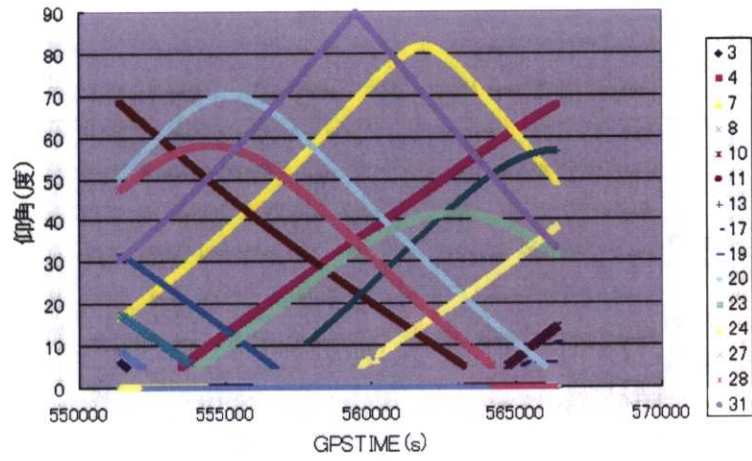
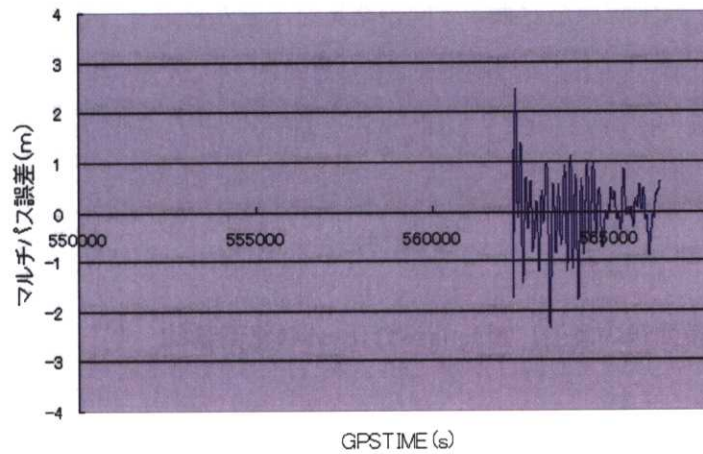
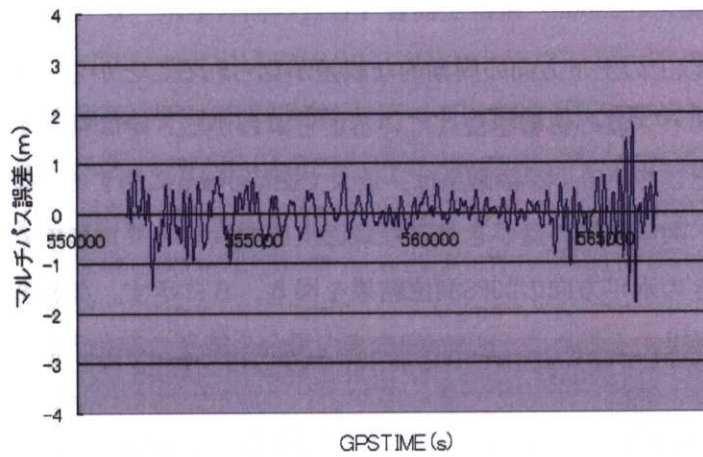


図6. 4 取得時間帯の各衛星の方位角（上）と仰角（下）



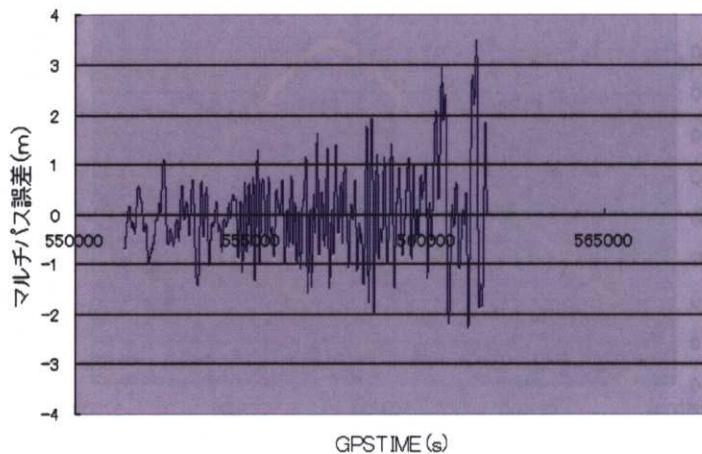


図 6. 5 反射の影響を受けている衛星のcc-difference値（上から7、24、28番衛星）

図 6. 5 より、1m以上の上下方向の周期的な誤差が見られることから、各衛星ともに、近接の壁によるマルチパス波の影響を受けていることがわかる。時間帯に応じてマルチパス誤差の大きさは変化している。28番衛星は、最大で振幅が6mに達するマルチパス誤差を受けている。これは、大学院棟の壁がきれいな鏡面反射の役割を果たしていたことによるものである。このときの水平方向のDGPS測位結果を図 6. 6 に示す。なお衛星の配置による悪影響をある程度無視するために、HDOPが3未満の場合の結果のみを示した。ここで中心の原点は、後処理の精密測位で求めた位置を基準としている。前のグラウンドの結果を比較すると、近接の障害物の影響により、大きなマルチパス誤差を受けていることがわかる。上記で示した3つの衛星のマルチパス誤差の影響も、当然ながら、このDGPS測位結果に含まれていることになる。大学院棟が北東の方向の衛星をほとんど遮っているため、そちらの方向の測位結果が悪く出ていることも確認できる。



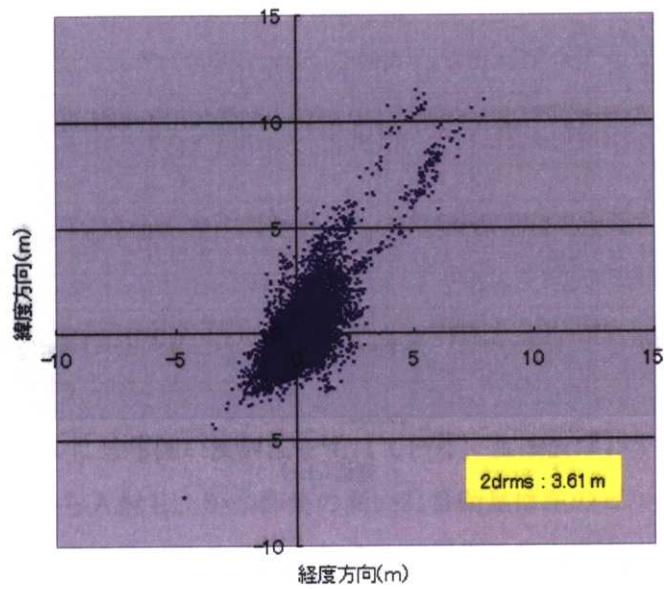


図6.6 水平方向のDGPS測位結果 (HDOPが3未満)

図6.5の28番衛星のマルチパス誤差の結果のうち、振幅が大きい時間帯の結果を拡大したものを図6.7に示す。この図において、2つの黄色で囲んだ部分の各エポックの相関波形のピーク付近の値を図6.8に示す。なおそれぞれ、5秒間の5回分のデータを列挙している。

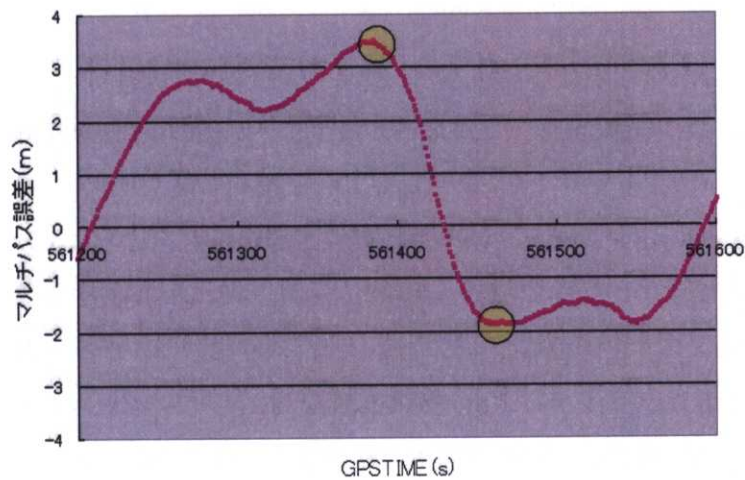


図6.7 28番衛星のcc-difference値 (任意の時間帯)

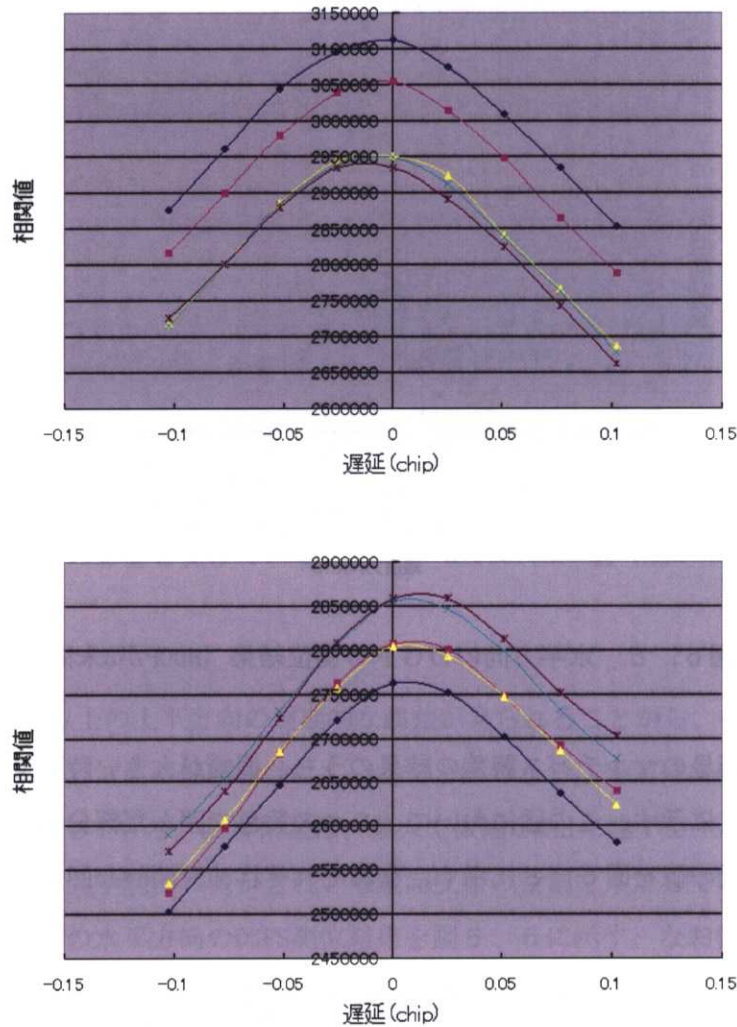


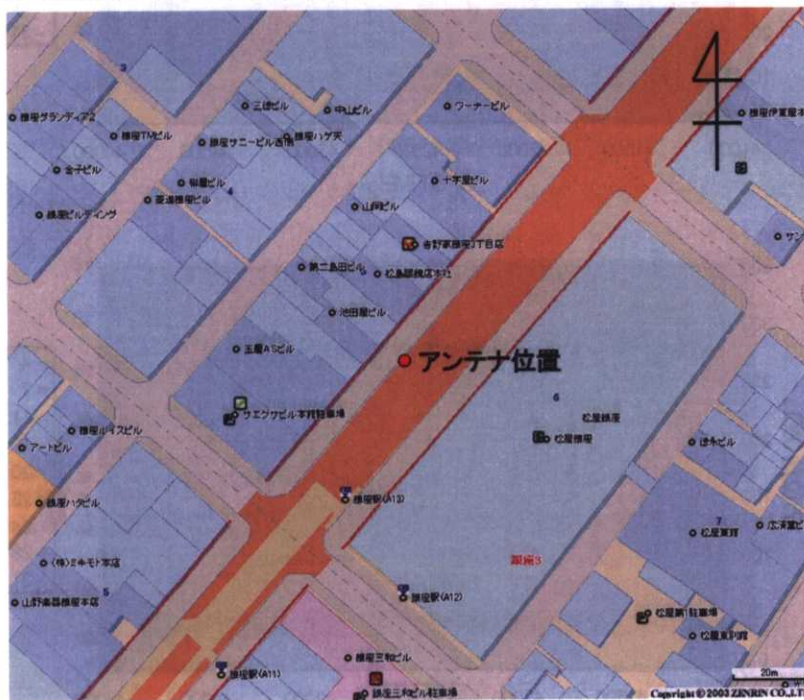
図6. 8 相関波形（上が最初の黄色、下が後の黄色の時間帯）

図6. 5で示されているマルチパス誤差を、擬似距離から引くことにより、より真の擬似距離の近づくことがすでに既知である。実際に、図6. 8の相関波形を見ると、前者の黄色の時間帯の結果より、遅延距離の比較的短い、負の位相のマルチパス波が混入していることがわかる。これは、マルチパス誤差が擬似距離に対してマイナスの方向に働くことを意味している。一方、後者の黄色の時間帯の結果より、遅延距離の比較的短い、正の位相のマルチパス波が混入していることがわかる。これは、マルチパス誤差が擬似距離に対してプラスの方向に働くことを意味している。これらの結果は、明らかに、先に示した図6. 7のマルチパス誤差の変化に対応したものになっている。なお、図6. 8の相関値の大きさは受信機内部のビット数やサンプリング周波数によって異なる値となる。

### 6. 1. 4 反射波と直接波の回折による環境

東京都中央区の銀座でデータを取得した。車にアンテナや受信機等を設置し、反射波が主に受信されそうな場所と時間を前もって調査してデータを取得した。取得場所の概要を水平図と3D図に分けて、図6. 9に示す。車を松屋百貨店の反対側に停車させ、40分ほどデータを取得した。このとき、4番、7番そして31番の衛星が北西の方向から入射しており、ちょうど松屋のビルに反射したマルチパス波が車のアンテナに入射される状況であった。取得時間帯の各衛星の仰角と方位角を図6. 10に示す。さらに可視衛星数変化を図6. 11に示す。図と各情報からわかるように、北西の方向から入射し、かつ仰角の高い4番と7番の衛星は松屋のビルによる強い反射波を受けている。直接波はわずかであると予想される。さらに南の方向から入射し、かつ仰角の高い31番衛星は左のビルに反射したマルチパス波と直接波の両方を受けていると予想される。可視衛星数を見てもわかるように、常に受信している衛星は4個か5個程度で、時折、ビルの谷間から受信される衛星が存在している。

ここで上記の予想を確認するために、4番、7番及び31番衛星の信号強度を図6. 12に示す。比較を容易にするため、基準局で取得したデータも示した。今回の実験では、同じアンテナと受信機、そして、ほぼ同じ長さのケーブルを用いているため、信号強度は基準局においても、移動局においても基本的にほぼ一致しているはずである。



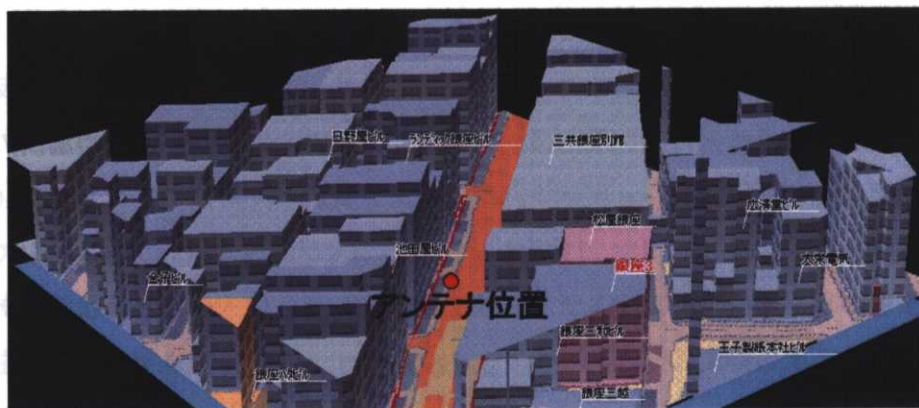


図 6. 9 取得場所の概要図（上が水平図、下が3D図）

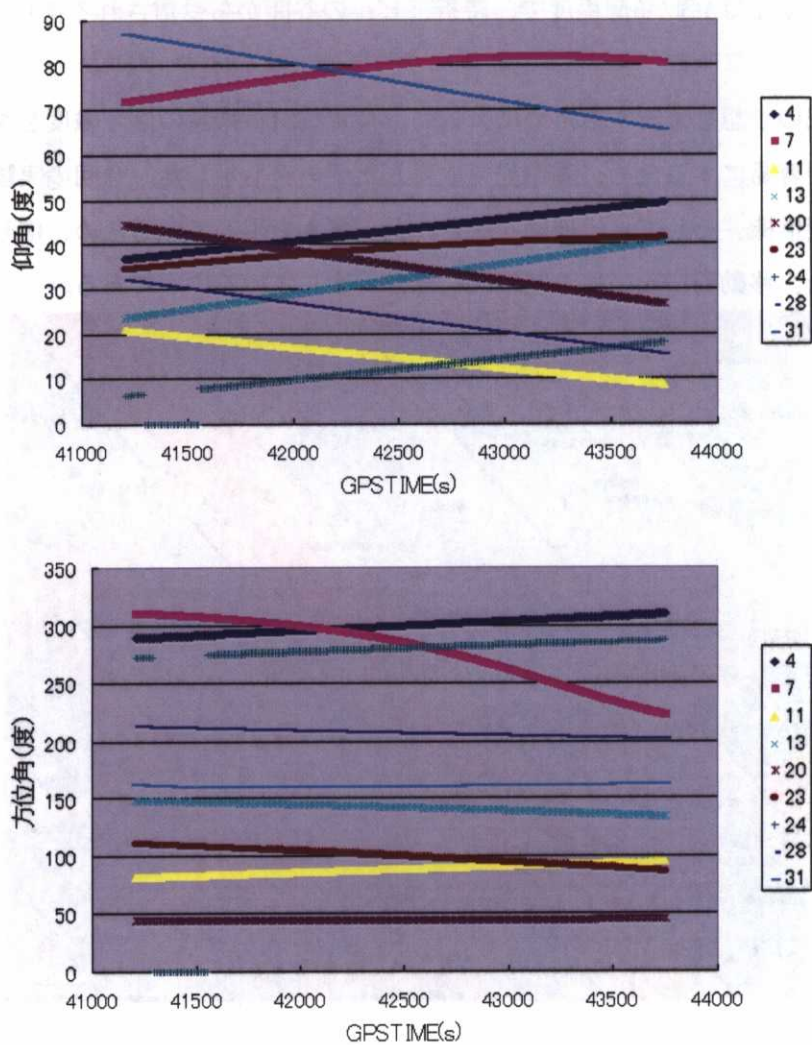


図 6. 10 取得時間帯の各衛星の仰角（上）と方位角（下）

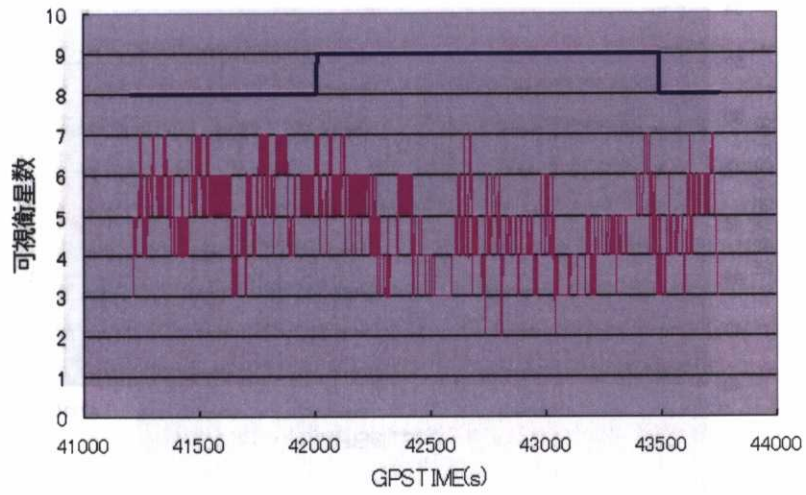
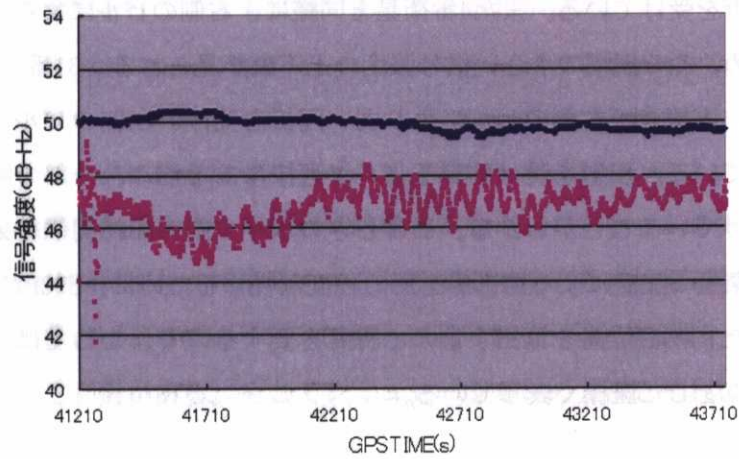
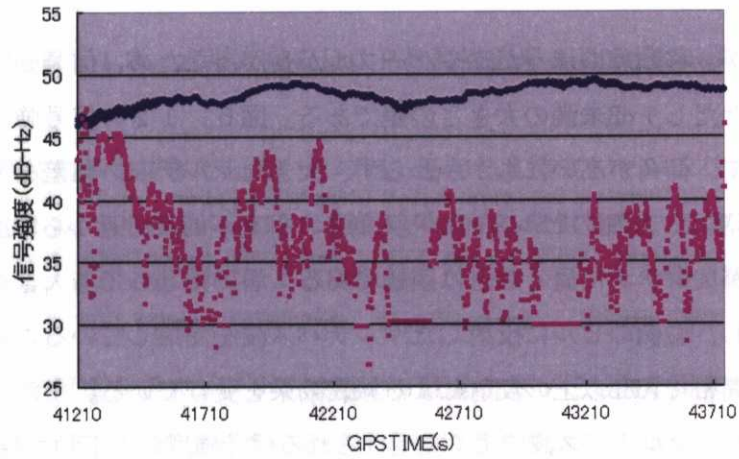


図6. 1 1 可視衛星数 (青が基準局、赤が移動局)



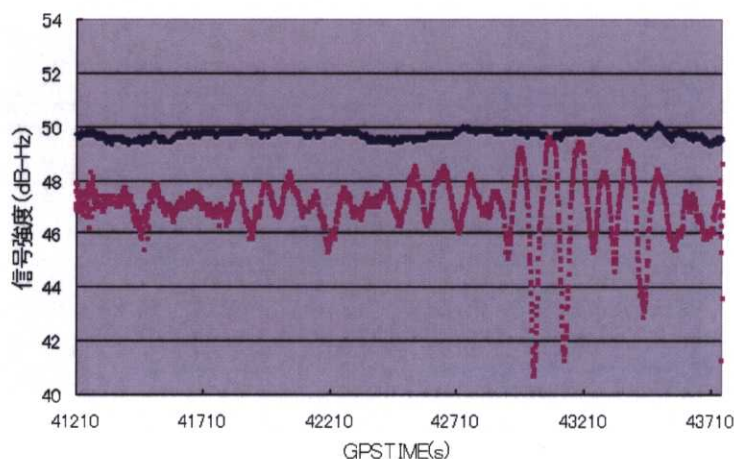


図6. 1 2 信号強度の変化（青が基準局、赤が移動局、上から4番、7番、31番衛星）

わずかではあるが、移動局のほうがややケーブルが長かったため、信号強度はやや低い値になっている。ただし1 dB未満の大きさの差である。図6. 1 2の信号強度の変化より、基準局と比較して、仰角が高いにもかかわらず、大きなマルチパス誤差を受けていることがわかる。4番衛星は、左側のビル方向から入射し、仰角が40度付近から50度付近へ推移しており、直接波がアンテナに届くことは困難である。届いたとしても大きく回折された電波である。ただし、右側のビルに反射したマルチパス波を受信していることが図よりわかる。大部分の時間帯で10dB以上の反射による減衰効果を受けている。またマルチパス波の位相の変化により、マルチパス波でよく見受けられる信号強度の上下動も観測されている。7番衛星は、左側のビルの方向から入射されているが、仰角が70度以上と非常に高いため、直接波は弱い回折を受けている。また4番衛星と同様に、右側のビルによるマルチパス波も混入しているため、やや振幅の小さい信号強度の上下動が見られる。31番衛星は基本的に7番衛星と同様で、直接波が右側のビルにより弱い回折を受け、左側のビルによるマルチパスの影響もを受けている。反射を受けているビルが近接にあるため、一部の時間帯では大きな鏡面反射を受けていることがわかる。このときの水平方向のDGPS測位結果を図6. 1 3に示しておく。衛星の配置による悪影響をある程度無視するために、HDOPが3未満の場合の結果のみを示した。精密位置を算出するのに時間を要するので、ここでは、基準局である研究室屋上を原点とした座標で表している。

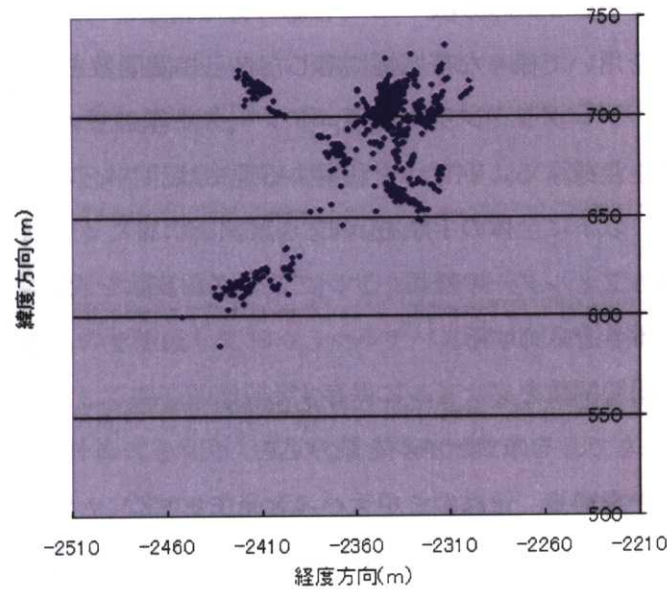


図6. 13 水平方向のDGPS測位結果 (HDOPが3未満)

HDOPが3未満の測位結果を抜きだしているのので、通常の直接波とマルチパス波の合成によるマルチパス誤差では、100mに及ぶような測位結果のずれを生じることはない。よって、反射波のみを受信し、本来の直接波による擬似距離から数十mずれた擬似距離で計算していることがわかる。

以上の3種類の結果より、アンテナを設置する環境によって、全く同じ性能の受信機とアンテナを用いた場合でも、測位結果の差は非常に大きく現れていることが確認された。また測位誤差を減少するためには、マルチパス誤差を削減するだけでなく、反射波のみを受信している衛星の検知を行うことも重要であることがわかった。

## 6. 2 各種コリレータに応じたマルチパス誤差推定シミュレーション

ここでは、後の節で利用するマルチパス誤差推定シミュレーションの方法について述べる。4章の最後でも述べたが、GPS信号の自己相関関数は信号の帯域幅に依存している。よってコリレータの違いによるマルチパス誤差を正確に評価するためには、自己相関関数に基づいた評価をする必要がある。そこでシミュレーションの方法とそれによる結果をこの節で示すことにする。

### 6. 2. 1 シミュレーションの方法

ここでは、MATLABを用いて様々な帯域幅に応じた自己相関関数を生成し、その後、その相関関数を利用して、プログラミングで各種コリレータに応じたマルチパス誤差推定シミュレーションツールを生成する。MATLABを利用する理由は、フィルターの設計が非常に簡便であるからである。以下に全体の手順を示す。

- 1) 使用する帯域幅とフィルターの種類、サンプリング周波数を設定する
- 2) 解析したい衛星番号を入力する。
- 3) 出力された自己相関関数をファイルに保存する
- 4) C言語のプログラムで、そのファイルを読み込む
- 5) 各種コリレータを設定し、任意のマルチパスを発生させる
- 6) 遅延距離とマルチパス誤差の関係を出力する（同相と逆相の場合）

図6. 14に実際に計算した10番衛星の自己相関関数を示す。帯域幅は20MHz、10MHz、4MHz、2MHzの4通りである。100次のFIR（有限インパルス応答）フィルターを用いた。上が全体を表した図で、下がピーク付近を拡大した図である。

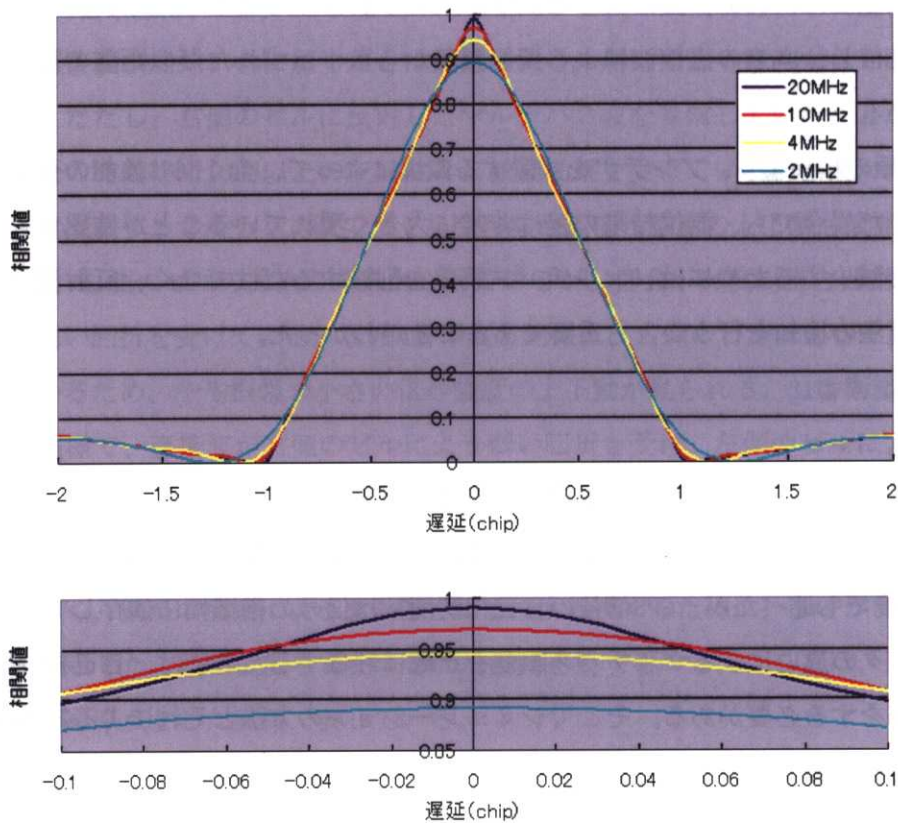


図6. 14 実際に計算した10番衛星の自己相関関数（4つの帯域幅のケース）



図を見ればわかるように、帯域幅が狭い場合、ピーク付近が非常になまっておき、逆に帯域幅をひろげると、より三角形に近い鋭い形状に近づいている。

次にプログラムの流れを説明する。

- ・ まず上記で求めた自己相関関数を読み込む。サンプリング周波数を81.84MHzに設定しているため、0.0125チップ毎の相関値を読み込む。
- ・ 発生させたいマルチパス波の直接波に対する振幅を決定し、上記の自己相関関数に振幅比を掛け合わせたものを生成しておく。マルチパス波は何個設定してもかまわない。ここで、各相関値に対して擬似距離雑音をランダムに加えておく。擬似距離雑音の値は通常のDLLによる雑音計算式を利用している。詳細は第8章の8.1式に示す。
- ・ 遅延距離を0.0125チップずつ0チップからずらしながら、直接波の自己相関関数とマルチパス波の自己相関関数を足した合成波を生成する。
- ・ 合成波に対して、どのような種類のコリレータでトラッキングを行うかを決定する。
- ・ 例えば、0.1チップのナローコリレータを選択した場合、合成波の左端(-2.0チップ)から、earlyとlateの相関値を引き算した値をストックしながら、遅延距離を0.0125チップずつずらししていく。ここでearlyとlateの幅は0.1チップである。
- ・ earlyとlateの差の関数と時間軸方向の軸との交点を求め、0チップからの差を求める。この差がマルチパス誤差に対応することになる。
- ・ 最後に、遅延距離とマルチパス誤差の関係を示す。

以上がシミュレーションの方法についての概要である。次に実際のシミュレーション結果を示す。

### 6.2.2 実際のシミュレーション結果

ここでは、前の手法を用いて、実際に3つのコリレータを使用して計算したマルチパス誤差と遅延距離の関係図を示す。使用したコリレータは、代表的な0.5チップコリレータ、0.1チップのナローコリレータ、そして0.1チップのストロボコリレータである。帯域幅の効果を示すために、0.5チップコリレータの場合は2MHzの場合と10MHzの場合を計算した。0.1チップの場合は、帯域幅は10MHzのみとした。さらに、マルチパス波の直接波に対する振幅比の影響も示すために、各コリレータにおいて、振幅比が0.75、0.5、0.25、0.125の場合を計算した。通常のコンクリートの鏡面反射では、仰角にもよるが、振幅比は0.25程度であることが知られている。0.5チップのコリレータは、通常の安価なGPS受信機で用いられている代表例である。0.1チップコリレータは最近の性能の良いGPS受信機では広く用

GPS 測位におけるマルチパス誤差の低減化と高精度測位の可能性について

いられており、ストロボコリレータの性能は、高精度GPS受信機の1つの指標となっていると考えられるものである。

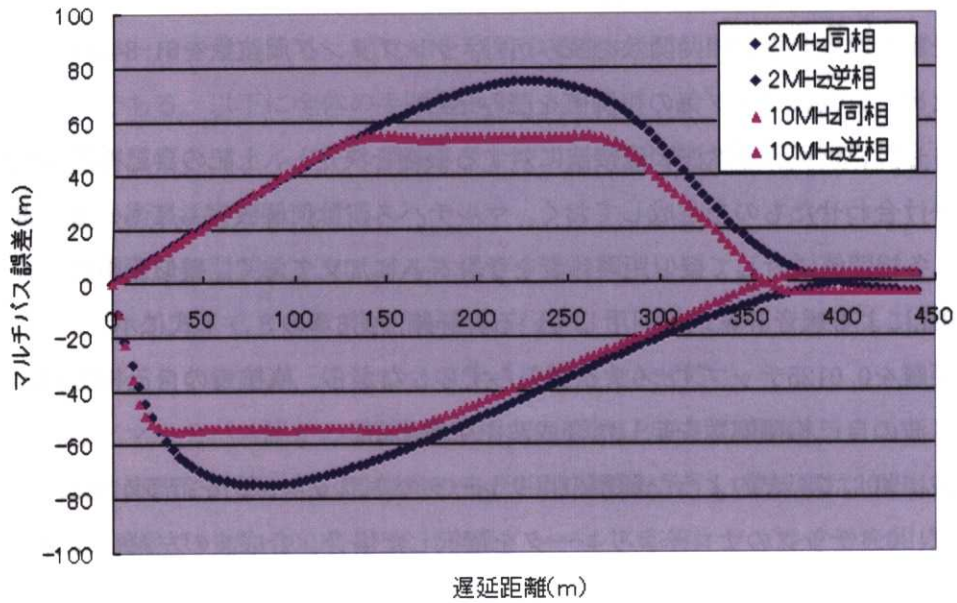


図6. 15 0.5チップコリレータのマルチパス誤差 (振幅比0.75)

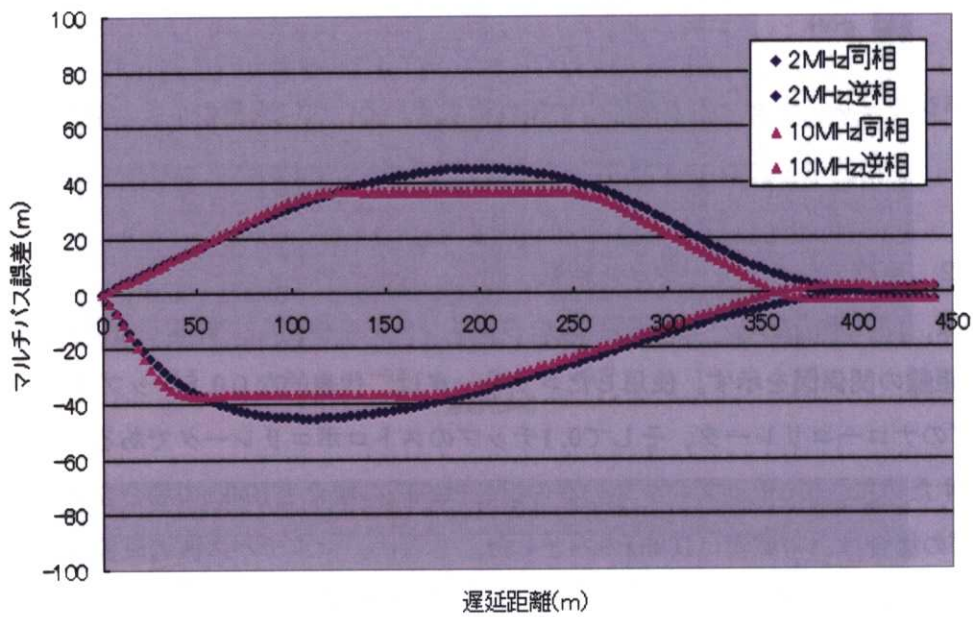


図6. 16 0.5チップコリレータのマルチパス誤差 (振幅比0.5)

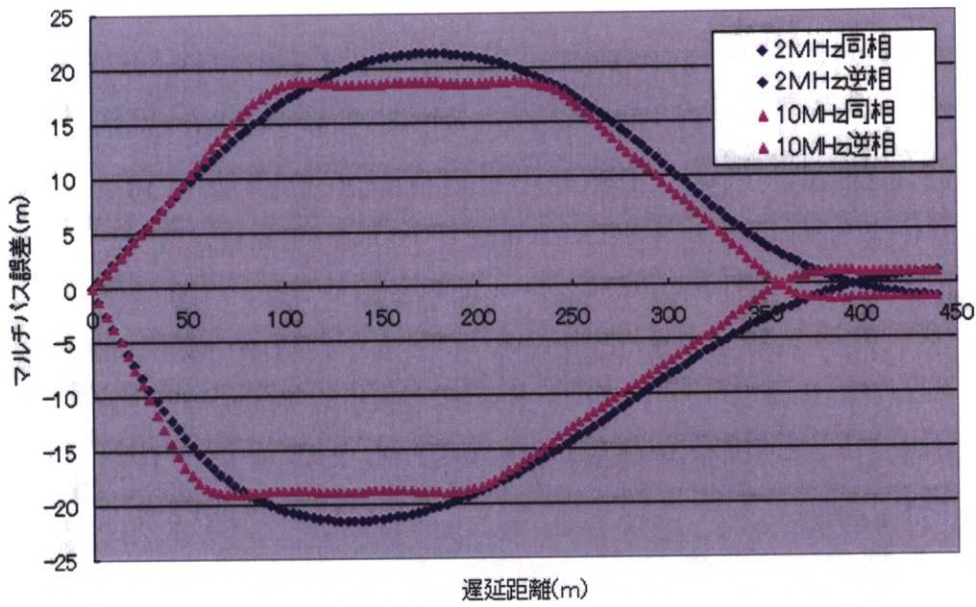


図6. 17 0.5チップコリレータのマルチパス誤差 (振幅比0.25)

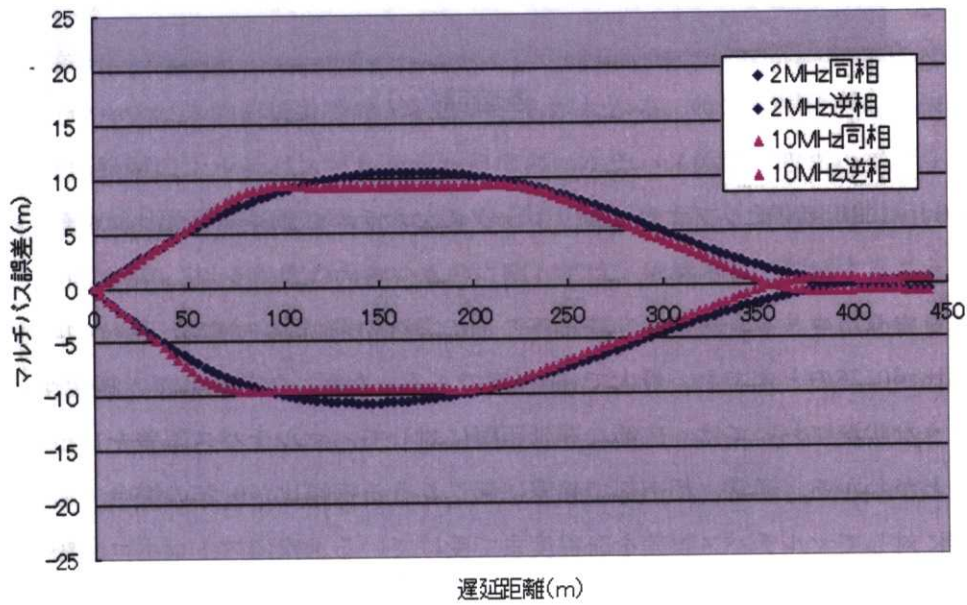


図6. 18 0.5チップコリレータのマルチパス誤差 (振幅比0.125)

図6. 15から図6. 18を見ればわかるように、0.5チップのコリレータでは、数10m以上に及ぶ非常に大きなマルチパス誤差を、0mから400m程度の遅延距離にわたって発生することがわかる。また図6. 15において顕著であるが、帯域幅が2MHzの場合と10MHzの場合では、最大で20m程度マルチパス誤差に差が見られる。帯域幅を広げるほど、マルチパスの影響を受けにくくすることが可能であるといえる。次に0.1チップナローコリレータの場合の結果を示す。

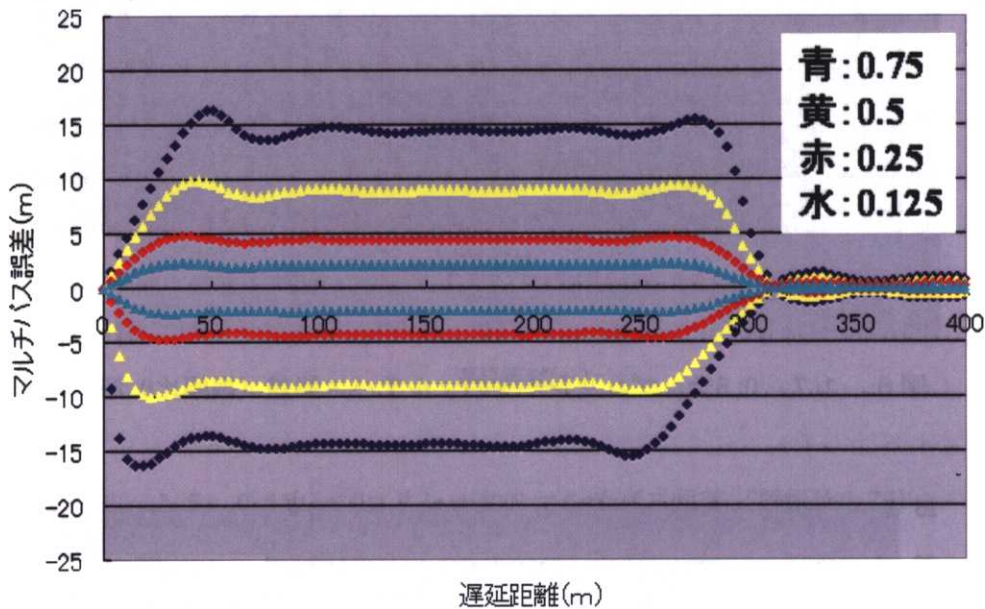


図6. 19 0.1チップナローコリレータのマルチパス誤差（振幅比は4通り）

図6. 19より、コリレータの幅を狭めることによる効果が明らかである。マルチパス誤差は振幅比が0.75のときでも、最大で16m程度である。ただ、依然として、振幅比が0.5を越えるような状況においては、広範な遅延距離に対して、マルチパス誤差を10m以上受けていることがわかる。通常、都市部で頻繁に起こりうる振幅比が0.25の場合でも、広範な遅延距離に対してマルチパス誤差を5m程度まで受けている。次にストロボコリレータの場合の結果を示す。

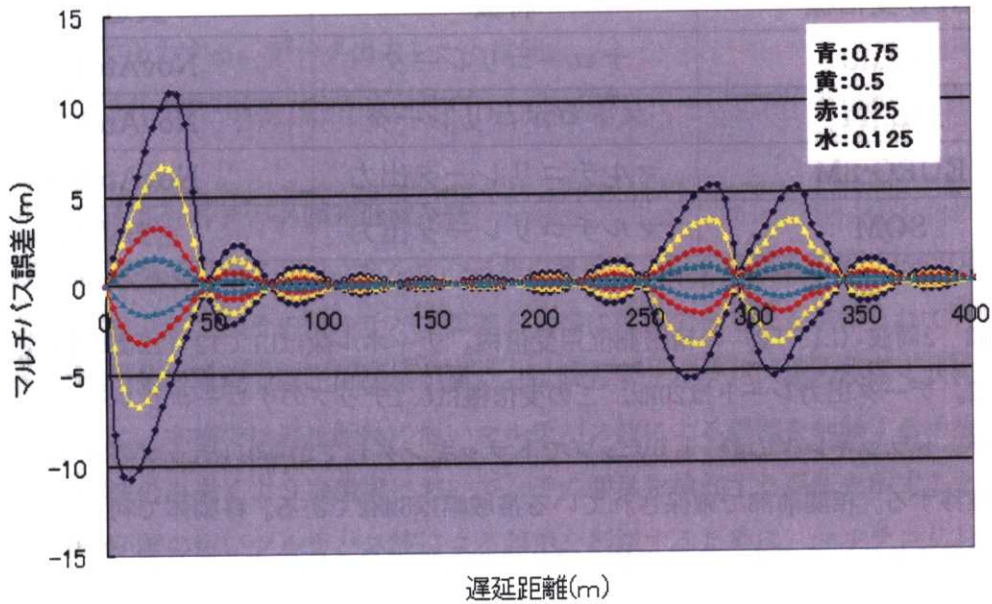


図6. 20 0.1チップストロボコリレータのマルチパス誤差（振幅比は4通り）

図6. 20より、ストロボコリレータによる効果が明らかである。マルチパス誤差は振幅比が0.75のときでも、最大で11m程度である。また遅延距離が50m程度から250m程度にかけてほとんどマルチパスの影響を受けていないことがわかる。特に振幅比が0.25未満の場合は、短い遅延距離のマルチパスでも最大3m程度のマルチパス誤差で収まっており、遅延距離が50m程度以降では、無視できる大きさとなっている。ただし、遅延距離の短いマルチパス波で、振幅比が0.5以上程度の大きいものに関しては、依然として削減することが困難であることがわかる。実際の都市部の環境では、振幅比が0.5に達することはあまり頻繁ではないが、起こる可能性は十分にある。

### 6. 3 実験に使用した受信機

#### 6. 3. 1 各受信機の特徴について

ここで実験に使用した各受信機の特徴についてまとめておく。第1章の「はじめに」で示した表を再掲する。表中の受信機の特徴について順番に説明する。本章で提案したマルチパス誤差低減技術は、以下のOEN3受信機とSQM受信機から出力される生データ情報を用いて実現されるものである。具体的には、0.2チップナローコリレータとマルチコリレータ(0.025チップ幅)の双方の機能を有する受信機であれば実現できる。

GPS 受信機	特徴	製造元
OEM3	ナローコリレータ	NovAtel 社
OEM4	ストロボコリレータ	NovAtel 社
EURO-3M	マルチコリレータ出力	NovAtel 社
SQM	マルチコリレータ出力	古野電気

- ・ **OEM3** 2周波 (L1、L2) の精密測位用受信機。チャンネル数はL1で12 (12個の衛星)、L2で12。データ出力レートは20Hz。この受信機は0.1チップのナローコリレータを有しており、トラッキングの際、1.0チップでトラッキングしてから0.1チップのトラッキングに推移する。相関前部で確保されている帯域幅は8MHzである。移動体で利用できるように開発されているため、衛星の見え隠れに対して素早く反応するために、一度トラッキングした衛星のパラメータ情報 (ドップラーやコードの調整値) を保持し、信号を再受信した際に1秒以内で再捕捉することを可能にしている。また擬似距離算出部において、コードループの雑音帯域幅を狭めることにより、擬似距離の雑音を大幅に削減している (数mから10cm程度まで)。ただし雑音帯域幅を狭めるとループの応答が遅くなるため搬送波位相追尾ループによる擬似距離変化率の正確な推定値を利用している。この技術はキャリアスムージングという名前で知られており、高精度受信機では広く利用されているものである。これ以外にもカルマンフィルター等が利用されている部分は存在するが、主に擬似距離と搬送波位相を出力した後の測位計算部においてである。
- ・ **OEM4** 2周波 (L1、L2) の精密測位用受信機。基本的に上記のOEM3の持つ機能を全て持ち合わせている後継機である。唯一の違いは、コリレータの違いで、ストロボコリレータの機能 (pulse aperture correlatorと呼ばれている) を有している。また帯域幅も8MHzから16MHzに広げられている。
- ・ **EURO-3M** 1周波の静止用マルチコリレータ対応受信機。OEM3と同様にナローコリレータの機能を有する。ナローコリレータでトラッキングしたポイントを中心に、-0.1チップから0.1チップまで0.025チップごとの相関値を出力することができる。チャンネル数は8である。またMEDLLの機能を有し、受信機内部でチャンネルごとに1つのマルチパス波を推定することが可能である。静止用 (安定かつ信頼性の高い信号が入力されるまでトラッキングを続ける) なのでOEM3やOEM4と比較すると、信号品質を確保するために、トラッキングに多くの時間を要する。帯域幅は16MHz。データ出力レートは1Hz。
- ・ **SQM** 1周波のマルチコリレータ対応受信機。0.1チップのナローコリレータを有しており、トラッキングしたポイントを中心に、0.025チップごとの相関値を128ポイントまで

出力できる。L1の12チャンネルであるが、マルチコリレータ機能については選択した2衛星について出力する。データ出力レートは5Hz。

#### 6.4 提案するマルチパス誤差低減技術

これまでに述べてきたように、マルチパス波の直接波に対する遅延距離が40m程度以上の信号に対しては、すでにそのマルチパス誤差を大幅に削減できることが知られている。また、実際の都市部の環境では、直接波が届くとは限らずマルチパス波のみ届く状況も考えられる。ゆえに、本節では遅延距離の短いマルチパス波による誤差を削減する手法を示すことと、反射波のみ届くような環境において、その衛星を検知する手法を示すことを目的とした。遅延距離の短いマルチパス波による誤差を削減するために、マルチコリレータの出力を利用することにした。反射波のみのマルチパス波を検知するために、信号強度等の受信機出力による生データを利用することにした。

##### 6.4.1 受信機出力の生情報を用いた使用不可衛星の検知手法

本章の6.1.4項で示したように、反射波のみの信号が受信される場合は、信号強度が通常よりも低いことが容易に予想される。ここで周囲が十分に開けた環境において測定した、仰角とL1帯の信号強度の関係を図6.21に示す。1Hzで24時間取得した全衛星のデータを元にして、仰角1度ごとに示している。使用したGPS受信機はOEM4で、アンテナはGPS702である。ケーブル長は約20mで減衰量は1mあたり約0.5dBである。マスク角は10度とした。

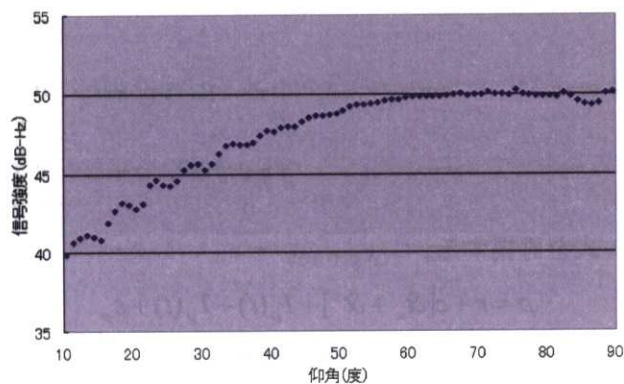


図6.21 信号強度と仰角の関係図 (24時間平均)

図6.21において、仰角が30度未満の領域で、やや信号強度が揺れている箇所がみられ

るが、これは地面からのマルチパス波による影響を受けたものであり、もしアンテナに高性能のチョークリングを採用していれば、これよりも滑らかになることが予想される。全体としては、仰角10度において、40dB程度存在し、仰角60度程度まで漸近的に50dB程度まで上昇し、それ以降は50dB程度で一定となっている。この結果については、同じような設備を用いて実験すれば、同様の結果が得られることは明らかである。次に、コンクリートの反射減衰量を示す。

表6. 1 コンクリートの反射減衰量 (dB)

周波数	無筋コンクリート		有筋コンクリート			
	普通	軽量	普通	軽量	普通+磁気 気タイル	気泡入
700MHz	7.5	7.5	9.5	8.5	9.0	7.0
1GHz	7.5	7.5	9.5	9.5	8.5	12.0
6GHz	8.0	7.0	8.0	7.0	7.0	16.0

上の表の値は、全て電波が鏡面反射した場合の減衰量を示している。実際の状況では、鏡面反射することはまれで、一部のエネルギーが反射されることが多い。よって、GPSにおいて、反射波のみ受信する場合は、少なくとも7dB程度は減衰されていることが予想される。もちろん、平らな鉄製の物体に反射された場合は、減衰量はこの値よりも少ないことが予想されるがまれである。よって、反射波のみを受信しているかどうかの判断基準として、信号強度は有力な1つであるといえる。問題点としては、GPSの電波は、樹木に遮られたり、障害物の回折の影響を受けている場合においても、信号強度が容易に減衰することである。ただし、このような状況下では、直接波の信号もすでに乱されており、その衛星の擬似距離の精度は劣化しているので、使用しないほうが良いといえる。

次に擬似距離の変化率について述べる。2章の2. 6式ですでに表したように、GPSにおける擬似距離のモデル式を再掲する。

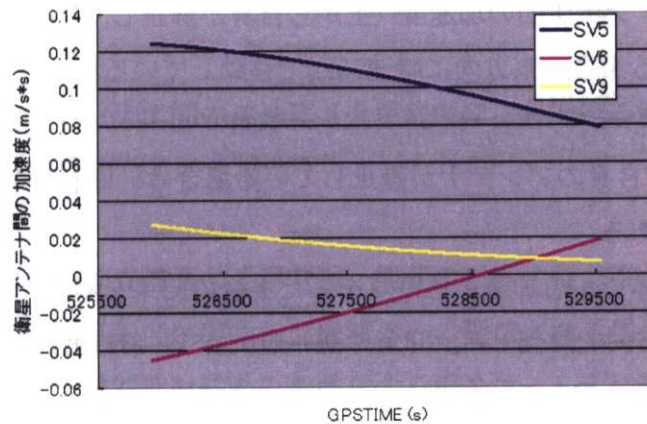
$$\rho = r + c[\alpha_u + \alpha^s] + I_\rho(t) + T_\rho(t) + \varepsilon_\rho$$

ここで、エポックごと（例えば1秒ごと。移動体ではエポック間隔は1秒以内である）の擬似距離の変化率を考える。まず大気圏効果の電離層と対流圏の遅延量は、通常の状態では、その変化率は数cm以内である。次にマルチパス誤差とノイズについてであるが、ノイズによる誤差は10cm以内（ただしコードループの帯域幅を狭めた場合）で、その性質上、エポック間での時間依存はない。マルチパスによる誤差は環境の悪い場所では、



エポック間で数10cm程度変化することがあるが、通常の状態ではエポック間の変化は数cmである。衛星の時計誤差は、エポック間の変化は数cm以内であり、受信機の時計誤差は、エポック間の変化は数cmから1m程度である。最後に、真の距離のエポック間の変化は、衛星が非常に速いスピードで動いているので、視線方向で1秒間に数100mである。また自身のアンテナが動いている場合も1秒間に視線方向で数m程度変化することになる。よって、エポック間の変化率として大きいものは、衛星が動くことによる変化と自身のアンテナが動くことによる変化であるといえる。ここで、さらに変化率の変化率(加速度)を想定すると、GPS衛星が動いている効果と自身のアンテナが動いている場合の効果以外は、完全に無視してよいと考えられる。

以下に、GPS衛星が動いている効果と自身のアンテナの移動の効果のみを考慮したシミュレーションを行った。アンテナが静止している場合と、時速50kmで北及び東方向にそれぞれ等速で移動している場合の擬似距離の変化率の変化率(加速度)を調査した。さらに自身が加速している場合も考慮して、時速0kmから100kmまで10秒間で急加速し、5秒間で急停止した場合の擬似距離の変化率の変化率(加速度)も調査した。衛星の位置はエフェメリスよりエポックごとに計算した。解析時間は等速運動の場合が1時間で、加速運動の場合が1分とした。エポックは1秒間隔である。仰角と方位角に応じて3つの衛星をバランスよく選択した。図6. 22に静止の場合、図6. 23に急加速・急停止の場合の結果を示す。



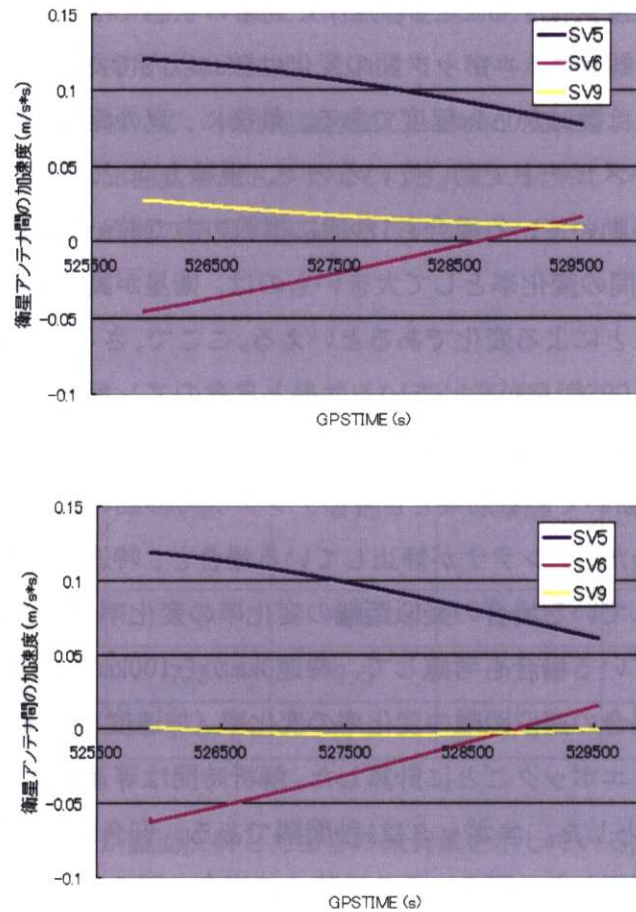


図6. 2 2 衛星-アンテナ間の加速度（上から自身が静止している場合、北方向に時速50kmで移動している場合、東方向に時速50kmで移動している場合）

上の3つの結果より、自身のアンテナが静止している場合は、衛星アンテナ間の加速度大きくて10cm程度である。

次に、車等の移動体で、急加速と急停車をした場合の結果を示す。衛星は均等に4つ選択し、北方向と東方向で評価した。仰角の高い順に、SV1 (311度)、SV6 (123度)、SV5 (51度)、SV16 (236度) である。括弧内は方位角である。下の2つの図より、車等の移動体で、急加速または急停車する場合は、衛星アンテナ間の加速度は大きく変化することがわかる。実際に上記のような急加速・急停車を行うことはまれであるが、移動体においてはこのように数m程度まで大きく変化することを考慮する必要がある。ただし、車から方位センサーと車速センサーを取り出せる場合は、上記の数mの変化を1m程度まで容易に補正することができる。

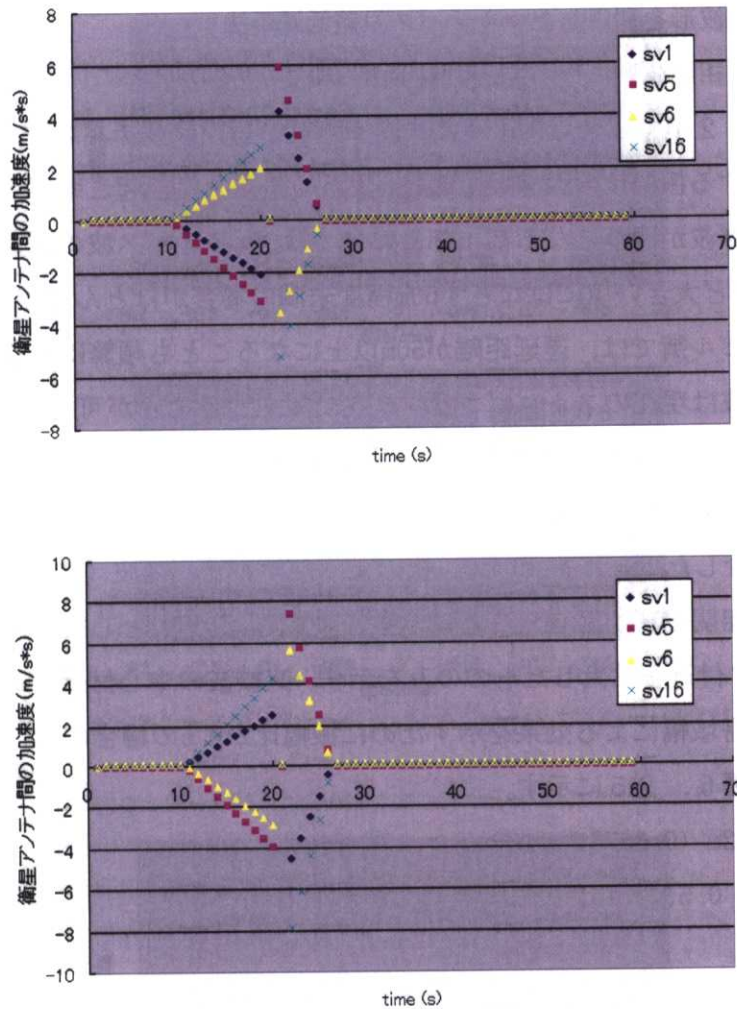


図6. 23 衛星-アンテナ間の加速度（上が北方向に急加速急停車している場合、下が東方向に急加速急停車している場合）

実際に、反射波のみの受信をする場合は、周囲の環境にもよるが、突然受信する場合と、徐々に直接波の信号強度が落ちて反射波のみの受信になる場合等がある。通常に直接波を受信していて、突然反射波のみを受信する場合は、トラッキングがうまく動作しない可能性もある。これらのことを考慮して、反射波のみを受信したときの衛星を、擬似距離変化率の変化率（加速度）から検知することになる。このような現象は主に都市部で起こるが、特に道路の幅が広く建物の高い場所では、直接波と反射波の経路長の差が大きいので、容易に判別することが可能である。都市部でも、道路の幅が狭く、建物に近接している場合は、検知するための閾値をうまく設定する必要がある。受信機出力の生情報を用いた実際の衛星検知評価については、次の節で紹介する。

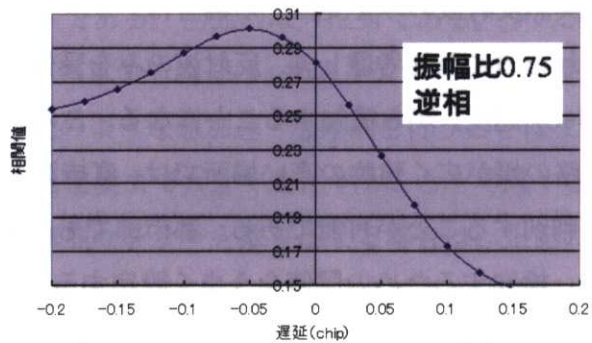
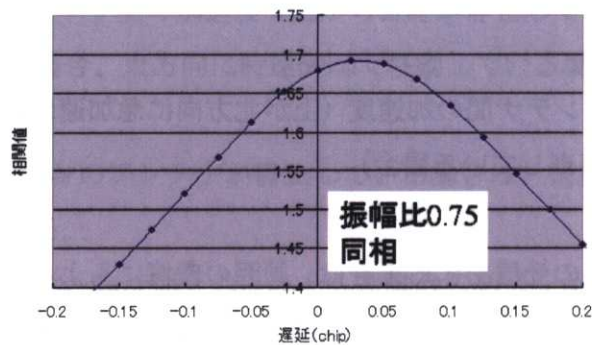
6. 4. 2 相関波形を利用したマルチパス誤差低減手法

6. 4. 2. 1 相関波形についてと低減手法の概要

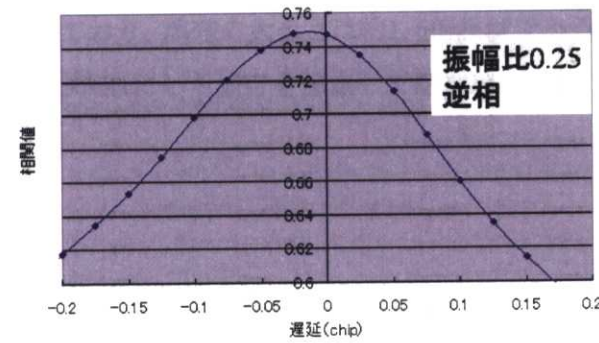
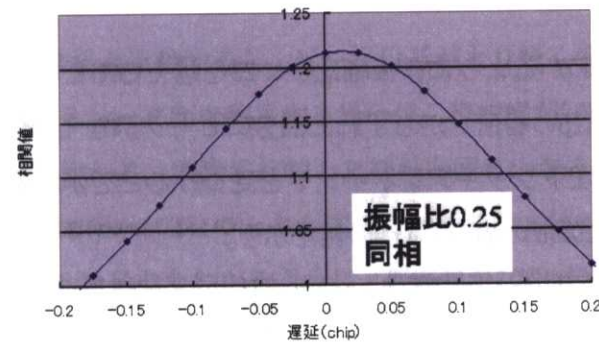
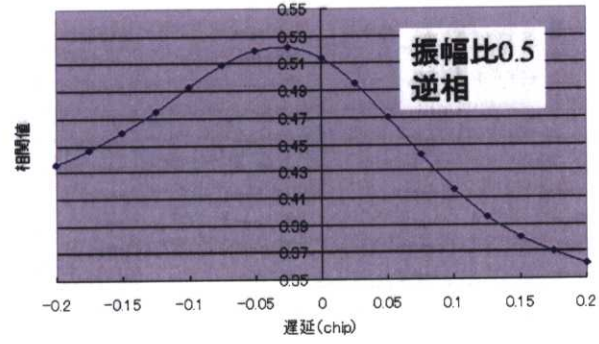
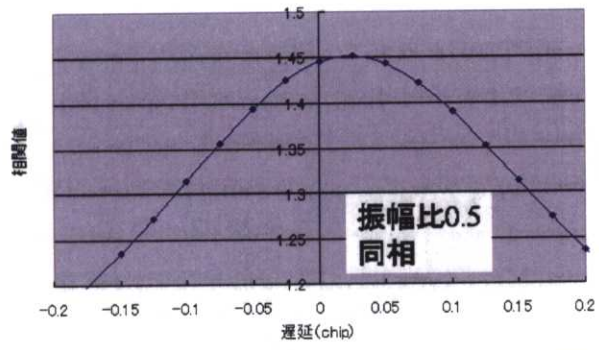
前節の6. 2. 2項で紹介したように、遅延距離の短いマルチパス波で、マルチパス波の直接波に対する振幅比の大きいものは、数mの誤差を引き起こす要因となっている。実際にマルチパス波が問題となる都市部においては、マルチパス波の遅延距離は場所にもよるが、それほど大きい値にはならず50m程度未満の場合がほとんどである。ただし、新宿等の超高層ビル街では、遅延距離が50m以上になることも頻繁にあるので、そのようなマルチパス波は現在のストロボコリレータで対処することが可能である。ここでは、このストロボコリレータでも対処できない遅延距離の短いマルチパス波による誤差を低減する手法について説明する。

6. 2項で紹介したツールを用いて、次のようなマルチパス波（同相と逆相のみ）が存在するときの相関波形を図6. 24に示す。帯域幅は10MHzとした。遅延距離が短いことから、ピーク付近を拡大したもののみを示す。直接波の中心付近の最大相関値を約1.0としている。帯域幅による効果を示すために振幅比が0.5の場合のみ、帯域幅が20MHzのときの結果も図6. 25に示す。

- ・ 遅延距離：約22m (0.0075チップ)
- ・ 振幅比：0.75、0.5、0.25、0.125



第6章 提案するコードマルチパス誤差削減手法



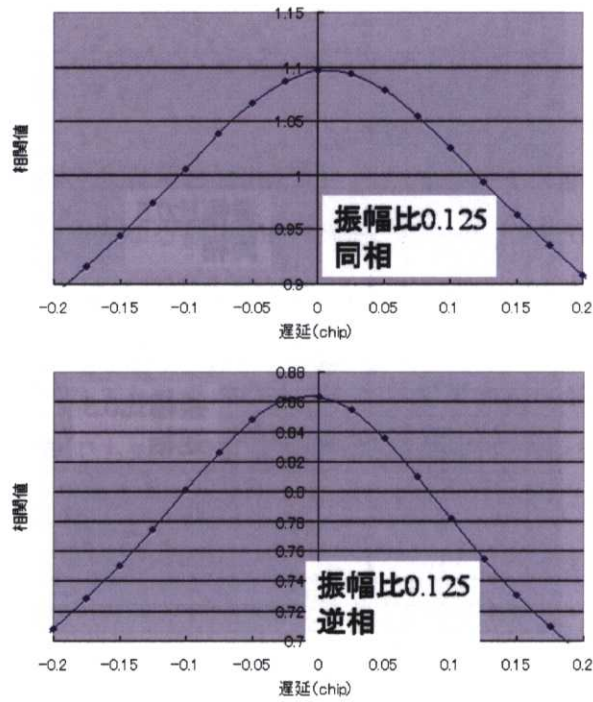


図6. 2 4 様々なパラメータによる相関波形（上から振幅比が0.75, 0.5, 0.25, 0.125）

図6. 2 4の結果からわかるように、振幅比が0.25を越えるあたりから、真のトラッキングポイント（遅延が0chipの場所）からずれた部分にピークがきている。大きなマルチパス波が存在すると、正確なトラッキングポイントを見つけることが非常に困難であることがわかる。下に帯域幅が20MHzの場合の1つの例を示す。

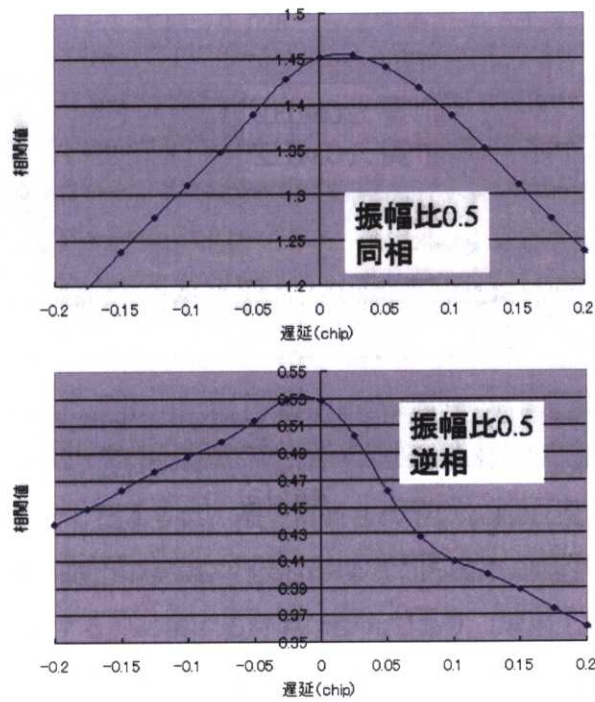


図6. 25 帯域幅が20MHzのときの相関波形（振幅比は0.5）

帯域幅が10MHzのときの結果と比較すると、ピーク付近がより鋭く捉えられていることがわかる。よってストロボコリレータ等を利用する場合は、帯域幅が20MHzのほうがマルチパス誤差は低減できることがわかる。実際に比較した結果を図6. 26に示す。ただし、相関波形のピーク自体は、帯域幅が10MHzのときと同様に、正確なトラッキングポイントからややずれている。図6. 26を見るとわかるように、帯域幅が20MHzの場合は、遅延距離が30m程度以上でマルチパスの影響を受けなくなっている。一方、10MHzの場合は、50m程度までマルチパスの影響を受けており、誤差の大きさは約1.5倍程度であることがわかる。よって、これ以降では、帯域幅を20MHzにした場合を想定して話を進める。

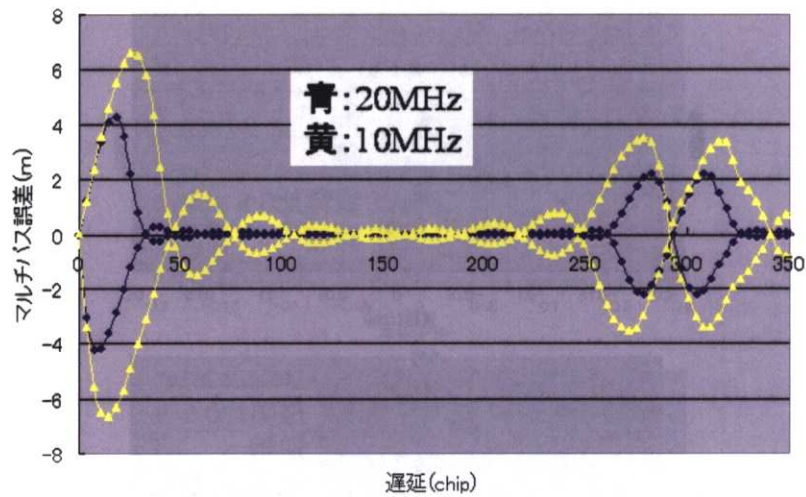


図6. 26 帯域幅の違いによるマルチパス誤差の比較（振幅比は0.5）

マルチパス誤差を推定する上で重要なことは、マルチパスのパラメータをより正確に推定することである。特に5. 4節のMEDLL技術の例を見れば、そのことは明らかである。マルチパスの係数は、振幅、遅延そして位相差の3つである。アンテナで受信されているマルチパス波の数だけ、これらのパラメータが存在することになる。実際の推定では、パラメータのうち、位相差は振幅比に効いてくるので正しい振幅比を推定できれば、位相差を推定することは特に必要ではない。実環境では、複数のマルチパス波が受信されることは多々あるが、それらの複数のマルチパス波のうち、トラッキングの誤差に数m程度の大きな影響を与えているマルチパス波は1つであることが多い。つまり支配的なマルチパス波を推定できれば、ある程度マルチパス誤差を低減することが可能である。

#### マルチパス誤差低減手法の概要

では、その支配的なマルチパス波をどのように推定するかについて提案した手法の概要を述べる。推定の流れは以下の通りである。実際の推定手法については後の6. 4. 2. 2以降で説明している。

- ・ マルチコリレータ受信機により、相関波形を取得する。
- ・ 支配的なマルチパス波の振幅比を推定する。
- ・ 支配的なマルチパス波の遅延距離を推定する。
- ・ 最小二乗法により、再度上記のパラメータを推定する。
- ・ 推定したパラメータより、生じたマルチパス誤差を計算する。



マルチコリレータ受信機としては、0.025チップ間隔で-0.5チップから0.5チップ程度まで出力できるものが望ましい。最初のマルチパス波のパラメータの推定では、パラメータの初期値を与えている。初期値の推定精度はおおよそ振幅比で0.1未満、遅延距離で20-30m未満である。さらに初期値を中心にして決めた範囲内で最小二乗法により、より正確なマルチパス波のパラメータを推定する。

### 既存の技術との違いについて

GPS測位における最小二乗法を用いたマルチパス波を推定する技術は、既に論文では提案されている。MEDLLとMMT (Multipath Mitigation Technology) の2つである(本章の参考文献参照)。第5章で紹介したように、唯一市販されているMEDLL受信機の性能は、既存のストロボコリレータの性能と同等もしくはそれ以下であることが知られている。さらに実際にマルチパス波を探索するのに要する時間は膨大であり(理論上では可能である)、1衛星の場合でも推定時間を1秒以内にするには困難である。本手法では、まずマルチパス波のパラメータの初期値を求めることにより、探索範囲を絞り込み、推定時間の大幅な短縮と推定誤りの低減を図っている。さらに実データを用いた検証において、その精度がストロボコリレータの機能を有する受信機よりも高いことを実証することができた。

#### 6.4.2.2 マルチパス波の振幅比の推定方法

次のようなマルチパス波を想定したときの、相関波形の各ポイントでの隣同士の傾きを調査した。チップ幅は0.025チップである。位相差は同相と逆相のみとした。これは同相と逆相時に、マルチパス誤差が最大になるからである。

- ・ 遅延距離が約15m、振幅比が0.0から0.9
- ・ 遅延距離が約60m、振幅比が0.0から0.9
- ・ 遅延距離が約120m、振幅比が0.0から0.9

遅延距離が15mのときに振幅比を変化させたときの、相関波形の傾きを図6.27(同相)と図6.28(逆相)に示す。なお0チップ以降を示している。

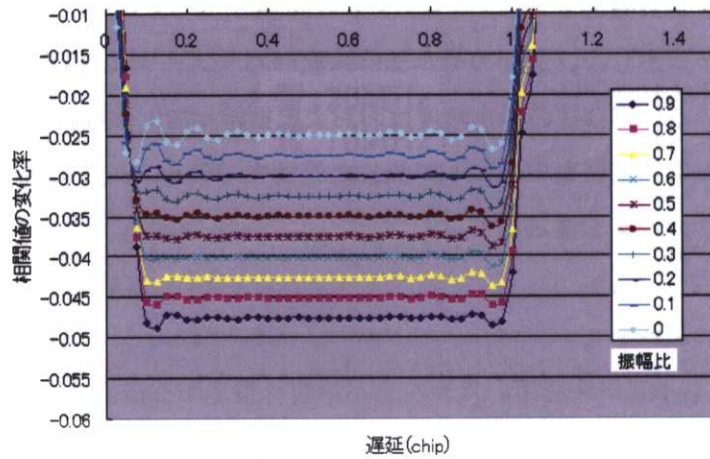


図 6. 2 7 相関波形の各ポイントでの傾き（同相、遅延約15m）

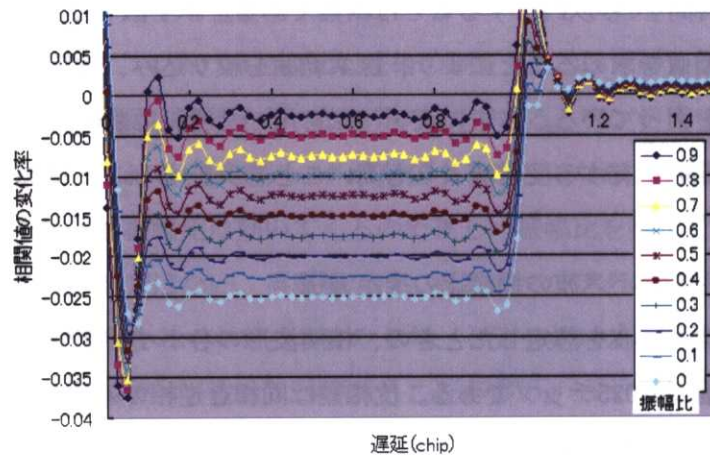


図 6. 2 8 相関波形の各ポイントでの傾き（逆相、遅延約15m）

上の2つの図より、変化率が一定になっている部分では、マルチパス波の振幅比に相関波形の各ポイントでの傾きが比例していることがわかる。実質的にマルチパス波の存在しない振幅比0の場合、約-0.025となり同相と逆相で一致していることがわかる。問題は、変化率が平らになっている部分をきちんと判別できるかであるが、遅延距離の短い支配的なマルチパス波が存在する場合、急峻な変化率をもつ部分は、両端に限られるので比較的容易であることが予想される。残りの遅延が60mの場合と120mの場合の結果を以下に示しておく。同相と逆相の振る舞いについては、すでに上で示されているので、同相の場合のみを示した。図 6. 2 9 より、ちょうど遅延距離に対応した0.2チップ付近に急激な変化が見られる

が、それ以降は、上記と同様に1チップまで平らな部分が見られる。図6. 30も同様である。振幅比に対応した相関値の傾きは、マルチパス波の遅延距離が変化しても一定であることがわかった。よって、マルチコリレータによる相関波形を取得できれば、それらの値より、支配的なマルチパス波の振幅比を推定する手段の1つであることがわかる。

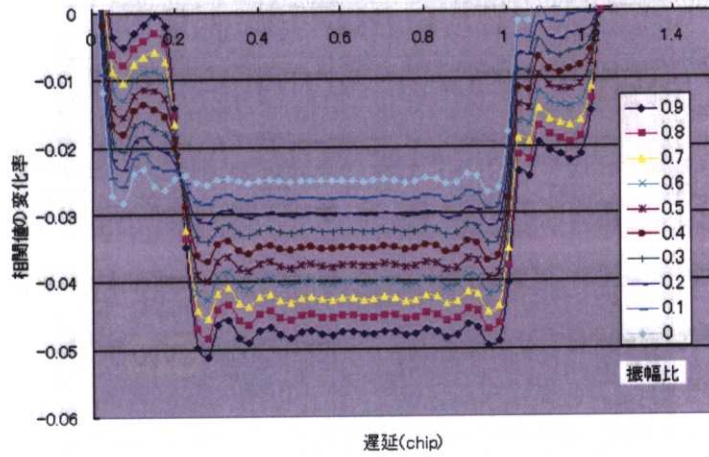


図6. 29 相関波形の各ポイントでの傾き（同相、遅延約60m）

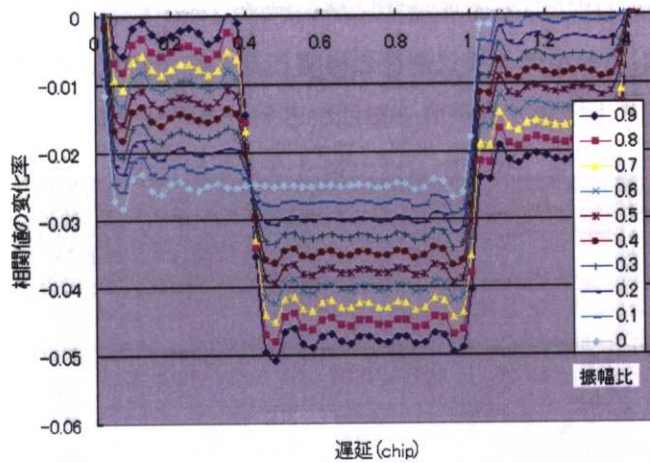


図6. 30 相関波形の各ポイントでの傾き（同相、遅延約120m）

GPS 測位におけるマルチパス誤差の低減化と高精度測位の可能性について

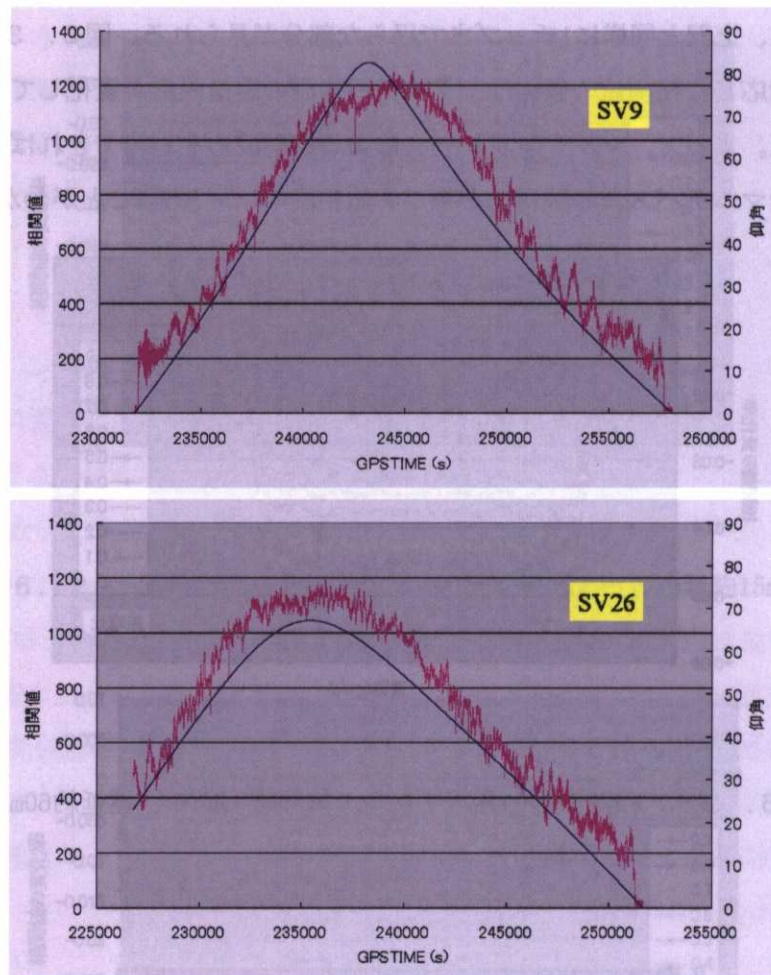


図 6. 3 1 マルチコリレータの相関ピーク値と仰角との関係

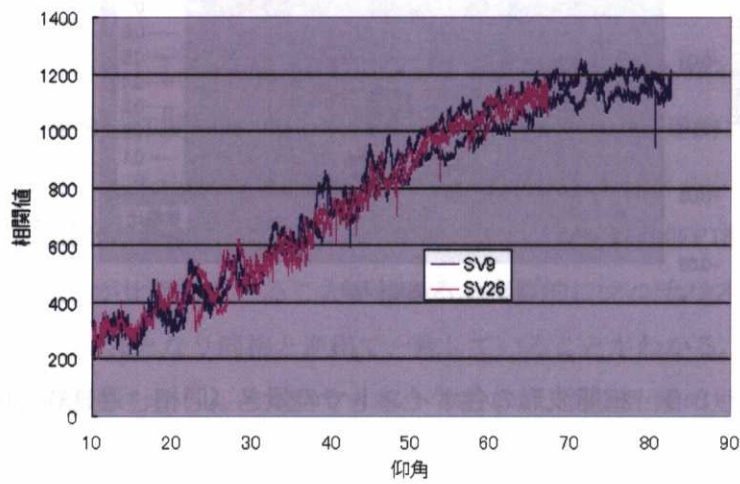


図 6. 3 2 横軸を仰角にしたときの相関ピーク値との関係 (衛星は9番と26番)

#### マルチパス波の振幅比の推定に関する注意点

上記の推定方法は、直接波の振幅を1.0と仮定していることに注意しなければならない。もし、直接波の振幅が0.9であれば、直接波のみの傾きは約-0.0225になる。さらに半分の強さのマルチパス波が存在する場合、その振幅は0.45となり、傾きは約-0.03375となる。よって、振幅比を推定する際には、直接波のピーク値がどの程度の値かを前もって知る必要がある。この値は、使用する受信機とアンテナごとに、仰角依存で求めておくことが望ましい。実環境では、直接波のピークの振幅値が、回折などにより仰角依存からはずれる場合が容易に想定される。直接波の振幅よりも、マルチパス波の振幅のほうが大きいこともある（反射波のみ受信の特殊場合も含む）ので、直接波の振幅値を未知数として取り扱う必要がある。実際にマルチパスの少ない環境（研究室屋上で周囲にはアンテナや避雷針が存在）で取得したマルチコリレータのピーク値と仰角との関係図を図6.31に示す。受信機はSQM受信機で、アンテナはGPS702である。約10時間取得したデータより、できるだけ長い間可視であり続けた2つの衛星（SV9とSV26）について抜き出した。図6.32に横軸を仰角、縦軸を相関値としたときの図も載せておく。選択した2つの衛星ともに、雑音はやや大きいですが、仰角に対して同様の相関値であることがわかる。仰角が60度付近までは直線的に比例し、60度付近から天頂にかけて収束傾向が見られる。

マルチコリレータ用のGPS受信機から得ることのできる情報は、直接波とマルチパス波を足した複数の相関値のみであり、実際には、直接波を常に1.0に固定することはできない。直接波による相関値もマルチパス波による相関値もダイナミックに変化している。そのような場合を想定して、0チップにおける相関値を利用して推定する。0チップにおける相関値は直接波とマルチパス波が加算された値になっており、直接波の相関値が未知でも、大きく変動しないと仮定できれば、その短い周期での変動はマルチパス波によるものである。そこで、数百秒の間隔の平均値（静止又は歩行者の場合に適用可能）を常に計算することにより、その平均値に対する実際の相関値より振幅比を推定する。実際の例は実データによる評価（6.5項）で説明する。

#### 6.4.2.3 マルチパス波の遅延距離の推定方法

ここでは、遅延距離の推定方法について述べる。振幅比を推定した場合と同様に、相関波形の傾きを利用して最初におおよその推定を行う。図6.33に0.2チップ遅れで振幅比0.5のマルチパス波が存在するときの相関波形とその傾きを示す。

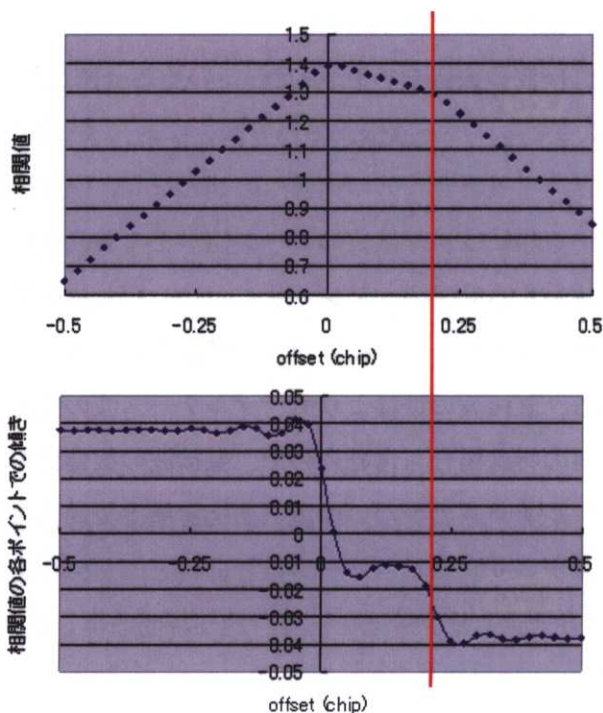


図 6. 3 3 相関波形と各ポイントでの傾き  
(上が相関波形で下が各ポイントでの傾き)

相関波形の各ポイントでの隣同士の傾きより、どのくらいの遅延距離で支配的なマルチパス波が混入しているかを予測する。相関値の各ポイントでの隣同士の傾きが一定になる直前を、支配的なマルチパス波の遅延距離の初期推定値とする。10m程度の精度で把握して以下に進む。上図の赤線はちょうど0.2チップを指している。ただし、マルチパス波の振幅比が非常に小さい場合（0.1未満）に推定することは困難なので、無理に推定することはしない。

#### 6. 3. 2. 4 最終的なパラメータの推定方法

これまでにマルチパス波の振幅比と遅延距離をある程度の精度で推定してきたので、より正確にマルチパスのパラメータ推定を行う。推定したマルチパス波の振幅比と遅延距離より、マルチパス波の相関波形を生成する。直接波の相関波形についても同様に生成する。人工的に生成した直接波とマルチパス波を足した相関波形が、実際に取得した相関波形に最も近づく時のパラメータ変動量を決定する。

最終的なパラメータの推定方法の概念図を図 6. 3 4 に示す。推定した直接波とマルチパス波のパラメータを前後にずらすことにより、実際の相関波形に最も近づく場合を探す

ことになる。振幅比に関しては、直接波、マルチパス波ともに0.01刻みで-0.1から0.1までずらす。遅延距離に関しては、直接波は観測した相関波形の中心ポイントに対して-15mから15m程度までずらし（0.1チップナローコリレータで生じる最大誤差程度）、マルチパス波は推定した遅延距離を中心に-20mから20m程度までずらす。ずらす変動量の最大及び最小値は、最初のマルチパス波の推定精度を考慮して決定する必要がある。元の相関値の間隔は、通常ハードウェアの制限があり、0.025チップ程度の間隔である。自身で生成するマルチパス波については、できるだけ細かい間隔で生成し（1m未満）ずらすことにする。ただし計算量が膨大なので、実時間で処理できるハードウェアの能力とのバランスによる。実際に上記の探索を行うと、1つの波形当たり数100msecを要する（CPU:Pentium4 2.8GHz OS:WinXP 動作環境:VisualC++6.0）。もし本手法のようにマルチパス波の初期推定を行わずに、全ての領域に渡って探索すると、リアルタイムに推定することが困難であることがわかる。さらに探索する領域が広がるほど推定を誤る可能性が高まることになる。

観測した相関波形より、直接波とマルチパス波のパラメータを推定することができたならば、マルチパス誤差の推定に移る。マルチパス誤差の推定に際して、2通りの方法が考えられる。1つ目は、求まる直接波の遅延方向のずれをそのまま本手法で推定したマルチパス誤差とする。2つ目は、推定したマルチパス波を観測した相関波形から引き、残った直接波（推定したもの）を元に新たに通常のコリレータ等でピークを中心を求めてマルチパス誤差を求めるものである。本手法で実データを処理する際には、1つ目の方法を用いている。

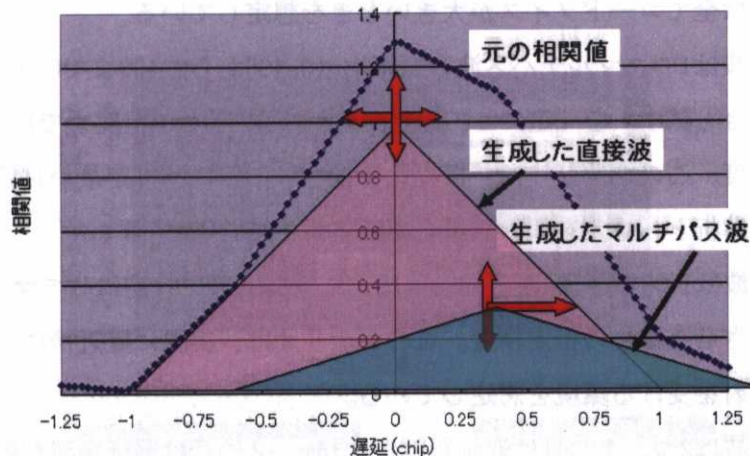


図6.34 パラメータの推定方法の概念図