

定点測位におけるコードマルチパス誤差の削減について

久保 信明^Y 安田 明生^Y

Reduction of Code Multipath Error in Static Positioning

Nobuaki KUBO^Y and Akio YASUDA^Y

あらまし GPS 測位におけるマルチパス誤差評価に関する実験的及び理論的考察は数多くなされており、特に単純な鏡面反射によるものについてなされている。しかし、実際にマルチパス誤差を推定してその誤差を測位計算におけるコード位相補正に用いての測位計算はなされておらず、また電波の回折による GPS 測位精度への影響もあまり調査されていない。本論文では GPS 測位において、鏡面反射によるマルチパス誤差分を推定し、コード位相補正に用いた場合、定点 DGPS 測位精度がどの程度改善するかを示す。また回折によるコード位相への影響についても示す。マルチパス誤差の推定には、従来の搬送波位相とコード位相の差を利用した技術と新たにアンテナと障害物の幾何学的配置関係より算出したマルチパス誤差を用いた。移動局アンテナが障害物からの反射波を受けている状態で、推定したマルチパス誤差のコード位相への適用により、高度方向の誤差が約 1/3 に減少することを確認した。さらにキャリアスムージングを適用すると高度方向の誤差が 1/10 以下に減少した。また回折による信号強度の低下を確認したが、信号強度の最低推奨値を確保していればコード位相での誤差は認められなかった。

キーワード マルチパス、反射、回折、DGPS

1. ま え が き

近年、GPS 測位システムは自動車のナビゲーションをはじめ、携帯電話による位置探索、精密な地殻変動の調査等様々な分野で利用されており、将来的には他の分野にも利用される可能性をもっていると考えられる。GPS 測位システムは他の衛星通信システムと異なり情報を伝達するだけでなく、より正確な位置情報を得ることが目的である。ゆえにできるだけマルチパス波の混入しない電波を GPS 衛星から取得することが重要である。しかしながら周囲が開けている場所での定点測位においても、最新の GPS 受信機でコード位相に対して数 10cm 程度のマルチパス誤差を生じることが知られており、近傍に障害物が存在する場合には、数 m 以上のマルチパス誤差を生じることがある。

マルチパス誤差の削減技術としては、受信機内部の相関方式を工夫した Narrow Correlator[1] や MEDLL[2]、Strobe Correlator[3] 等の技術が効果的であることが知られている。また相関方式以外にも、

複数の衛星が同じ仰角・方位角を通過するときのデータを利用したマルチパス誤差の推定 [4]、マルチパス誤差が信号強度に強い相関を持つことを利用したマルチパス誤差の推定 [5]、複数アンテナを利用した搬送波マルチパス誤差の推定 [6]、マルチパス誤差の変動を検知し、変動の大きい衛星を測位計算から省くことによる測位精度の改善 [7] 等の研究がなされている。

本研究では、まず反射と回折によるコード位相への影響を理論的に説明する。次に実験データを利用して理論値との比較を行う。最後にマルチパス誤差の推定とキャリアスムージングにより、移動局アンテナを障害物の近傍に設置した場合、DGPS 定点測位の誤差が高度方向で 1/10 以下に減少した実験結果を示す。マルチパス誤差の推定には、従来の搬送波位相とコード位相の差を利用した技術 [8] とアンテナと障害物の幾何学的配置から算出した値を利用した。後者の結果を利用することにより、前者の技術 [8] では推定できなかったマルチパス誤差の平均値の推定が可能となり、測位誤差が前者の技術のみの場合より 1/5 程度減少することを確認した。

^Y 東京商船大学、東京都

Tokyo University of Mercantile Marine, Ecchujima 2-1-6, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

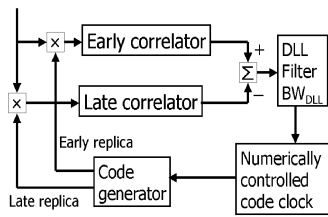


図 1 コード位相をトラックするための DLL
Fig.1 Delay lock loop to track code phase

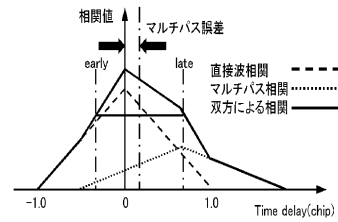


図 2 DLL による相関方法
Fig.2 Correlation method of DLL

2. マルチパスのコード測距に対する影響

現在の GPS 受信機で一般的に用いられている early{late DLL(Delay Locked Loop) の相関方式について説明する [9] .ここでは簡単のため入力信号の帯域制限が無いものとしている . 図 1 より DLL は early と late のコリレータによる相関値の差が 0 になるように追尾フィルタを介して数値制御発振器を制御し , コード発生器の C/A コードタイミングを調整する . そして図 2 よりコリレータ幅の中心位置がコード位相の追尾点となる . マルチパス波によって歪められた相関関数は , 本来の直接波による追尾点に対してバイアスをもつことになる . このバイアスがマルチパス誤差となる . 本研究では , 壁による鏡面反射のマルチパス波について , アンテナと障害物の位置関係よりマルチパス波の遅延距離 , 位相差 , 振幅比を決定し , マルチパス誤差を推定することにした .

図 3 に 1.0chip 差及び 0.1chip 差の early{late コリレータを用いた場合の , 直接波に対するマルチパス波の遅延距離とコード位相追尾の最大誤差との関係を示す . ここでの計算では , 振幅比を 0.25 とし , 遅延距離に対するマルチパス誤差の最大値を算出した . 今回実験に使用した 0.1chip 差の early{late コリレータによる受信機においても , 最大 4m 程度の誤差が生じることがわかる . 実際の測定においては , 振幅比や遅延距離が時間に応じて変化するので , この最大値の範囲内でマルチパス誤差を生じることになる

図 4 に 1 つのマルチパス波が混入した場合の , 直接波 , マルチパス波 , 双方を加算した波による 3 つの信号の相関関数を示す . ここでのマルチパス波は直接波に対して , 0.7chip の遅れ (1chip は約 293m に相当) , 振幅比は 0.4 で逆相とする . なお図 2 はマルチパス波が同相の場合の相関関数である . 両方の図より , マルチパス波が存在すると相関関数が非対称になり , 同相の場合は追尾点が遅れ , 逆相の場合は追尾点が進むこ

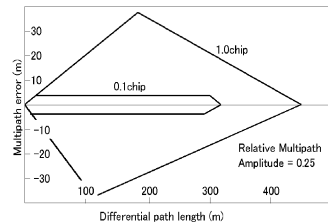


図 3 マルチパスによる C/A コード誤差の限界値
Fig.3 Bounds on C/A-code phase error due to multipath

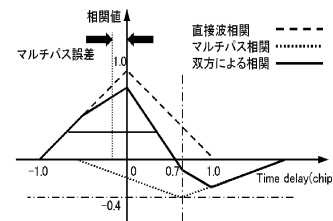


図 4 逆相のマルチパスによる相関図
Fig.4 Correlation peak after destructive interference with re°cted ray

とがわかる .

3. GPS 電波の障害物による回折

電波通路に障害物があると , 直進性を有する電波は遮蔽され受信点まで達することができなくなる . ただし , 電波には障害物を回り込む回折現象があるため , 障害物の背後でも受信可能であるがその受信電力は弱くなる . 一般的に電波通路の中心線と障害物との間隔をクリアランスといい , この値が第 1 フレネルゾーンの半径より大きいと , 電波のエネルギーが十分に通過することが知られている . クリアランスが第 1 フレネルゾーンより小さくなるにつれて単調に受信電力が減少し , 受信機の最低推奨信号強度付近で GPS 電波を正常に受信できなくなる . 周波数が L1 帯で 1.5754GHz , L2 帯で 1.2276GHz の GPS 衛星の電波で , この第 1 フレネルゾーンを算出すると次のようになる . GPS

衛星から障害物までの距離を 2 万 km, 受信アンテナから障害物までの距離を 10m と仮定すると, L1 帯で 1.39m, L2 帯で 1.56m となる. 受信アンテナから障害物までの距離を 50m にした場合, L1 帯で 3.08 m, L2 帯で 3.49m となる. そこで, GPS の受信アンテナを設置する場合, 回折の影響を受けなくするためには, 衛星{アンテナ間の電波通路と障害物の距離は少なくとも数m以上必要である.

次に障害物の近傍を通過する GPS 電波の信号強度の回折による損失値を実際に計算する. 障害物は簡単のため厚さが無視できる理想的なナイフエッジとする. ナイフエッジによる回折波の自由空間波に対する相対的な回折損 $J(\theta)$ は, θ が 0.7 より大きいときは次の式で近似される [10].

$$J(\theta) = 6.9 + 20 \log f \frac{P}{(\theta_i - 0.1)^2 + 1.0} + \theta_i - 0.1$$

なおパラメータ θ は次の式で与えられる.

$$\theta = h \frac{2}{d_1 + d_2}$$

右辺の h は送受信点を結ぶ直線とナイフエッジの先端との距離 (視線を遮る場合は正とする), λ は GPS 電波の波長, d_1 及び d_2 は, 送信点及び受信点とナイフエッジの先端との距離を示す. この式より, GPS 衛星からナイフエッジの先端までの距離を 2 万 km, 受信アンテナからナイフエッジの先端までの距離を 10 m と仮定すると, 電波通路とナイフエッジの先端までの距離が -0.5 m で約 2dB, 0 m で約 6dB, +0.5 m で約 10dB, +1.0 m で約 14dB の回折損を受けることになる. それゆえ信号強度が 50dBHz 程度ある高仰角の衛星については, 視線方向の電波が障害物に遮蔽されたとしても GPS 受信機の最低推奨信号強度さえ確保していれば, 回折された信号を測位計算に用いることができる.

4. 実験概要

本研究では, マルチパスの発生源を特定するために壁近傍のマルチパスを調査した. データ取得場所は茨城工業高等専門学校の屋上で, 高さが約 6m の直方体の形をした階段塔と高さ約 10m の直方体の形をした煙突, 高さ約 2m の百葉箱があり, それらの障害物以外は仰角 5 度以上を見通せる環境である. 屋上は平らなコンクリート面からなっており, 縁は高さ 50cm ほどのコンクリートで囲まれている. 図 5 に屋上の平面

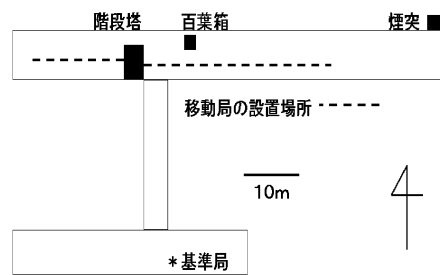


図 5 実験に使用した屋上の平面図
Fig. 5 A plan of roof

図を示す. マルチパスの原因となる障害物をできるだけ特定可能とするために, 移動局側のアンテナに対する障害物として階段塔を選んだ. DGPS 用基準局アンテナは仰角 5 度以上が見渡せる場所に設置した. アンテナ高は基準局, 移動局ともに屋上の平らなコンクリート面から 1m とした. 階段塔の壁からアンテナまでの間隔及びアンテナ高を変化させ, 場所ごとに最低 20 分から最大 24 時間のデータを取得した. データ取得間隔は 1 秒とした. 本実験では, コード位相, 搬送波位相, 信号強度, 衛星位置のデータを取得した. 使用受信機は Narrow correlator の機能 [1] を有するノバテル社製 RT-2, アンテナはチョークリング付きの GPS502 である. この受信機の最低推奨信号強度は約 30dBHz である. 全体のデータ取得期間は 2001 年 12 月 3 日から 12 月 14 日である.

5. マルチパス環境におけるデータ解析

壁の近傍にアンテナを設置した場合の 20 分間のデータより, 壁面による反射波の影響と壁の縁による回折の影響を調査した. なお同時間帯においてアンテナより高い位置からのマルチパスを受けていない場合の信号強度の評価値として, 周囲が十分に開けている場所 (図 5 の基準局位置) において同じ条件 (受信機, アンテナ, ケーブルを同じものにする) で 24 時間データを取得した. 横軸を仰角, 縦軸を全衛星による信号強度の 24 時間平均値とした結果を図 6 に示す.

壁面による反射波の影響を調査するために, 移動局を階段塔の壁面から西側に 3.5m の位置に設置した. まず, 壁面による反射波の影響を強く受けているときの 8 番衛星のコード位相におけるマルチパス誤差 (搬送波位相とコード位相の差を利用し 0 平均として求めたマルチパス誤差) と信号強度の値を図 7 に示す. マルチパス誤差と信号強度の変動に明らかな相関が見

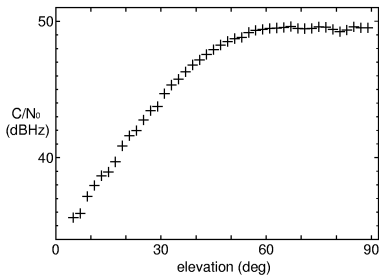


図 6 仰角と信号強度 (24 時間平均値) の関係
Fig. 6 Average of C/N₀ on elevation (24hours)

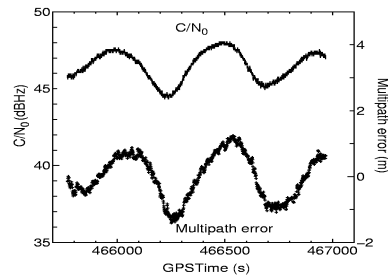


図 7 信号強度とマルチパス誤差の関係 (8 番衛星)
Fig. 7 Relationship between C/N₀ and Multipath error (sat8)

られる [5] . このときの 8 番衛星の仰角が 32.1 度から 31.9 度に变化していることから , 図 6 より仰角 32 度付近での C/N₀ 値は約 45dBHz である . 壁付近で反射波を受けた場合 , 信号強度は 44dBHz から 48dBHz の間で振動していることがわかる . 次に 2 項で述べたように , 遅延距離と推定した振幅比からこの条件下でのマルチパス誤差を計算した . 電波が壁面で反射されると , 一般的に電波の強さは減衰する (反射面がコンクリートで周波数が 1 GHz の場合約 8.0dB から 10.0dB の損失 [10]) . ここで GPS アンテナと障害物の幾何学的配置が変化せず , 反射によって位相が変化しないと仮定すると , マルチパス誤差はマルチパス波の位相変動すなわちマルチパス波の直接波に対する遅延距離から算出される . またマルチパス波の遅延距離は , 衛星のアンテナ - 障害物間の距離 , 仰角及び方位角によって算出される . アンテナに入射する直接波と反射波の関係を図 8 に示す . この 8 番衛星の場合 , 仰角 , 方位角の変化から 20 分間で遅延距離が 7.75m から 8.15m に变化している . ここで直接波とマルチパス波の位相差は遅延距離に応じて変化するのでマルチパス誤差の変動は約 2 波長分生じていることがわかる . マルチパス波の直接波に対する振幅比を 0.15 と仮定した (入射角とコンクリートによる反射減衰量を考慮して計算すると約 0.2 となりややずれたが , これはコンクリートの厚さや内部の材質を正確に反映していないことによるものであると考えられる [10]) . 図 9 に横軸を遅延距離 , 縦軸をマルチパス誤差とした計算結果を示す . なお遅延距離は図 7 の GPS 時刻に対応しているものとする . 図 7 の実際のマルチパス誤差と比較すると , 変動周期と変動振幅の値は両者でほぼ一致していることがわかる .

次に衛星の電波が壁の縁によって回折の影響を受けているデータを示す . 回折の影響を受けている衛星と

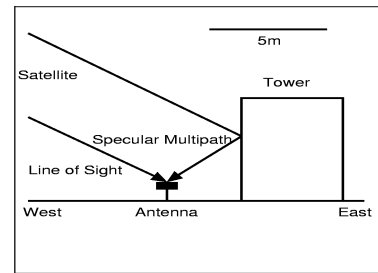


図 8 鏡面反射の状況
Fig. 8 Specular Multipath Situations

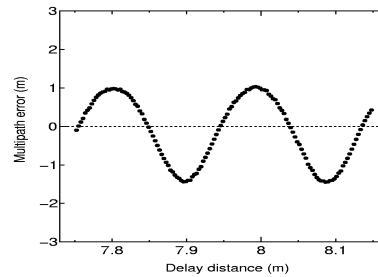


図 9 計算によるマルチパス誤差 (8 番衛星)
Fig. 9 Multipath error by simulation (sat8)

して 31 番衛星を選んだ . この衛星は 20 分間の観測区間の約 10 分後に壁によって視線方向の電波を遮られた . 図 10 に 31 番衛星の 12 分間の信号強度の値を示す . なお信号強度の図には同時帯に別の場所 (図 5 の基準局位置) で取得した 31 番衛星の信号強度を付加してある . 周囲の開けている場所での 31 番衛星の信号強度は 12 分間で 1dB 程度しか減衰していないが , 回折の影響を受けていると思われるときは 12 分間で急激に信号強度が減衰している . 次にナイフエッジの回折損の式より , 横軸をパラメータ , 縦軸を回折損としたものを図 11 に示す . $\theta = 0$ はちょうど衛星の電波が遮られる瞬間を表す . 図 10 と比較すると , 衛星が

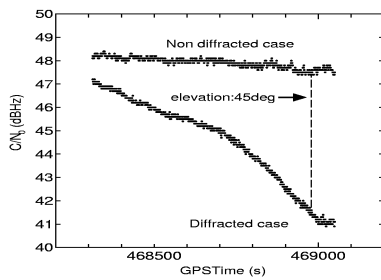


図 10 回折の影響を受けている衛星の信号強度 (31 番衛星)

Fig. 10 C/N₀ of sat31 affected by diffraction

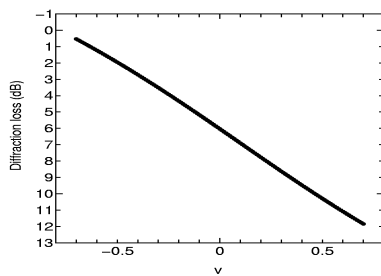


図 11 ナイフエッジによる回折損

Fig. 11 Diffraction loss in knife-edge-model

壁に遮られるまでの約 10 分間の信号強度の軌跡とナイフエッジの回折損による $\gamma=0$ までの回折損の軌跡に同じ傾向が見られる。31 番衛星はアンテナと壁の幾何学的配置より、仰角が 45 度付近で視線方向の電波が階段塔の壁の上縁によって遮られる。仰角が 45 度付近のとき図 6 より、約 48dBHz の信号強度が得られるはずであり、周囲の開けている基準局位置での結果とほぼ一致している。しかし視線方向の電波が壁に遮られようとしている場合の信号強度は約 42dBHz であり、ちょうど受信電力が理想値の半分となっている。この減衰量は回折による理論値 ($\gamma=0$ で 6dB の減衰) とほぼ一致しており、GPS の電波が回折の影響を受けていることを示している。ここで、この時間帯の 31 番衛星のマルチパス誤差をコード位相と搬送波位相の差より計算すると、GPS 衛星の視線方向の電波が遮られた後も大きな変動はなく、信号強度が 34dBHz 付近になってはじめてサイクルスリップ等の現象が起きていることがわかった。これは、信号強度が GPS 受信機の最低推奨値を満足していれば、遮蔽されてもその信号を測位計算に用いることができ、コード位相や搬送波位相情報が大きく乱されないことを示している。

6. マルチパス推定による DGPS 測位精度改善

5 項のデータ解析より、近傍の壁による反射と回折の影響を受けた場合の測定値と理論式による計算値がほぼ一致していることが示された。そこで、搬送波位相とコード位相の差より算出したマルチパス誤差の変動量 [8] と前項で理論的に算出したマルチパス誤差の平均値の双方を利用することにより新たにマルチパス誤差の推定を行い、その推定値を DGPS 測位の移動局側のコード位相に適用した。測位計算ではマスク角を 5 度とし、マルチパス誤差が数秒で大きく変化したり、サイクルスリップを起こしている衛星については、前もってその時間帯の測位計算から省いた。

DGPS 測位用実験データの取得概要は次の通りである。移動局をマルチパスの影響を頻繁に受ける階段塔の東側 (壁から 5 m の場所) に設置した。データ解析に用いた時間帯は 2001 年 12 月 5 日の夕方約 30 分間とした。基準局アンテナの精密な位置は、後処理の精密測量ソフトで国土地理院が提供する 3 つの電子基準点 (基準局アンテナ位置を囲む) データより算出した。

まず解析時間帯の基準局における信号強度とマルチパス誤差の値を図 12 に示す。同様に、移動局における信号強度とマルチパス誤差 (搬送波位相とコード位相の差を利用し $\gamma=0$ 平均として求めたマルチパス誤差) の値を図 13 に示す。衛星は 8 番 (仰角推移 $23^{\circ} \sim 30^{\circ}$)、22 番 (仰角推移 $25^{\circ} \sim 14^{\circ}$)、27 番 (仰角推移 $40^{\circ} \sim 39^{\circ}$) を選択した。マルチパス誤差の値は、衛星ごとの区別をつけるためにオフセットを持たせてある。図 12 の場合、8 番衛星は +5m、27 番衛星は -5m。図 13 の場合、8 番衛星は +7m、27 番衛星は -7m である。図 12 の基準局側のデータを見ると、周囲に障害物がないのでマルチパス誤差の変動は小さく、仰角の低い 22 番衛星でもマルチパス誤差の標準偏差は約 43cm であった。信号強度は図 6 の値と、仰角に応じてほぼ等しかった。以上より基準局で算出される補正値は大きなマルチパス誤差を含んでいないと考えられる。次に図 13 の移動局側のデータを見ると、3 つの衛星ともにマルチパス誤差と信号強度の値が大きく変動しており、22 番衛星のマルチパス誤差の標準偏差は 1m を超えている。22 番衛星のマルチパス誤差には約 3 波長分の大きな変動が見られる。これは建物の配置より、高さ 2m 程度の百葉箱に対する反射波によるものである。

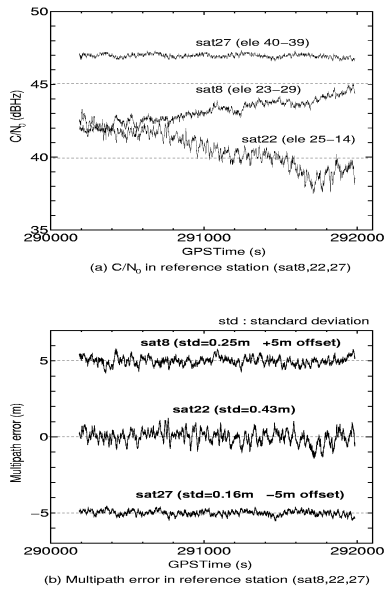


図 12 基準局側の信号強度及びマルチパス誤差
Fig. 12 C/N₀ and multipath error in reference station

ことがわかった．この箱は鉄製の板で覆われているためコンクリートの壁よりも反射係数が高く，マルチパス誤差の変動量は約 6m まで達していた．途中の約 15 分後から近傍の階段塔からの反射波を受けている 8 番衛星は，マルチパス誤差及び信号強度がマルチパス波の遅延距離に応じて変動していることがわかる．また 27 番衛星のように，階段塔の縁に隠れようとする衛星の信号強度は回折の影響により急激に単調減少していることがわかる．以上より移動局側で取得するコード位相には衛星によって数 m 以上の大きなマルチパス誤差が含まれている．

基準局側のデータに対してはマルチパス推定は行わず，マルチパス誤差の大きい移動局のデータに対してマルチパス誤差の推定を行った．推定方法は，まずコード位相と搬送波位相の差からマルチパス誤差の変動を算出し，変動を 0 平均とする．このマルチパス誤差変動を A とする．次に周囲の障害物との幾何学的配置関係より遅延距離と振幅比を推定してマルチパス誤差を算出する．このマルチパス誤差を B とする．ここで遅延距離はアンテナ位置と衛星の仰角，方位角より壁での反射点を決定すれば計算でき，その遅延距離より直接波との位相差を推定する．振幅比は障害物の誘電率と導電率そして電波の障害物への入射角より反射による減衰量を算出し，さらに直接波とマルチパス

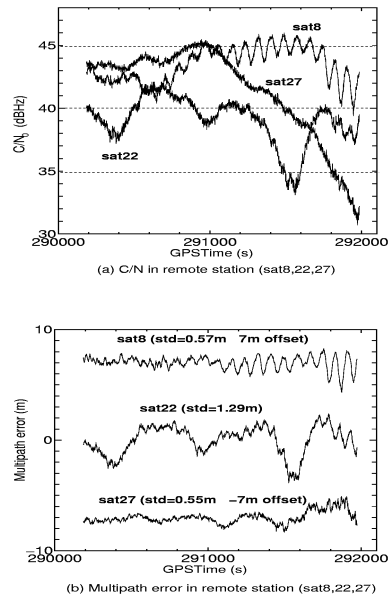


図 13 移動局側の信号強度及びマルチパス誤差
Fig. 13 C/N₀ and multipath error in remote station

波において，アンテナへの入射角に応じた利得の違いと右旋円偏波と左旋円偏波による利得の違いを考慮して振幅比を推定する．この段階で A と B の相違点は，A のほうが 0 平均としてマルチパス誤差を算出しているため，変動量は正確であるが上下方向のバイアスが残る．逆に B のほうは，振幅比等を推定して計算しているため，反射による微妙な変動を推定することはできないが，上下方向のバイアス分は A よりも正確である．このバイアス分を B から算出し，A に加算することにより，より正確なマルチパス誤差を算出する．算出した各衛星のマルチパス誤差を，各衛星のコード位相に加算して通常の DGPS 測位を行う．

図 14 に次の 4 つの条件による高度方向の DGPS 測位結果を示す．CS はキャリアスムージングを指す．

- (1) マルチパス推定なし，CS なし
- (2) マルチパス推定なし，CS 100 秒
- (3) マルチパス推定あり，CS なし
- (4) マルチパス推定あり，CS 100 秒

図 14 の (a) は，マルチパス推定及びキャリアスムージングなしの場合で，測位結果は大きく振動しており変動誤差の最大が約 6m に達している．(b) は，キャリアスムージングを行った場合で，周期の短いコード位相に含まれるノイズによる誤差成分が抑えられていることがわかる．誤差変動は最大で約 3m 程度である．

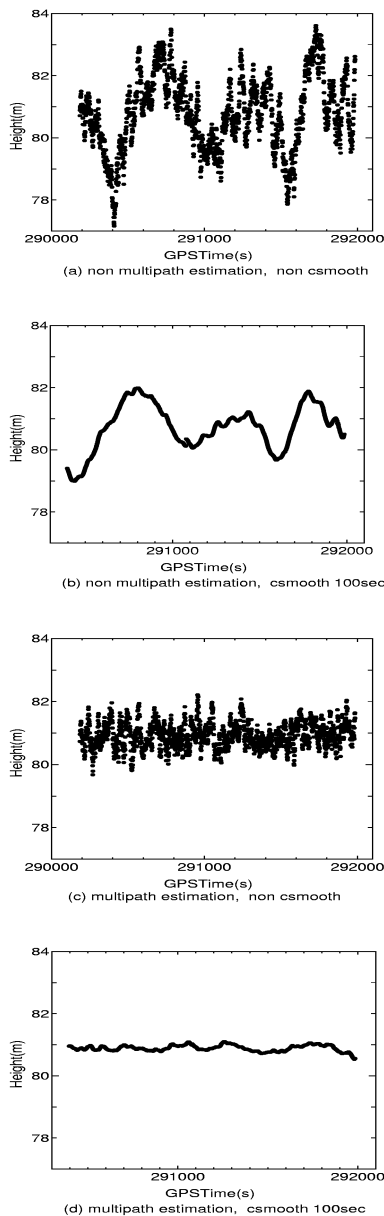


図 14 各条件における高度方向の DGPS 測位誤差
Fig. 14 DGPS height error on 4 patterns

(c) は、マルチパス推定を行うと、短い周期の誤差成分は残るものの、マルチパス推定を行わない結果と比較すると全体的に長い周期の誤差成分は削減されていることを示している。誤差変動は最大で約 2m 程度である。(d) では、マルチパス推定とキャリアスムージングを行うと、少しの飛びはみられるが、短い周期の誤差成分及び長い周期の大きな誤差成分がともに大き

表 1 各条件の DGPS 測位における高度方向誤差の標準偏差

Table 1 Standard deviation of height on DGPS

計算のパターン	高度方向の標準偏差
MP 推定なし,CS なし	1.19m
MP 推定なし,CS 100 秒	0.74m
MP 推定あり,CS なし	0.40m
MP 推定あり,CS 100 秒	0.10m

く削減されている。

表 1 にそれぞれの場合の高度方向誤差における標準偏差を示す。マルチパス推定及びキャリアスムージングを行うことにより、高度方向の誤差が 1/10 以下になった。表 1 において、MP 推定ありの場合はマルチパス誤差の平均値を考慮した結果によるものである。

なお 0 平均としてマルチパス誤差を算出した場合と、平均値を考慮してマルチパス誤差を算出した場合の DGPS 測位結果を比較するために、12 月 4 日から 12 月 13 日までの全データのうち、基準局を設置した 12 月 4 日から 12 月 7 日までの全てのデータを用いて各パターンで DGPS 測位を行った。データ取得の時間帯はいずれもその日の午後 5 時頃から翌朝の午前 8 時頃までの約 15 時間である。移動局のアンテナは、12 月 4 日は壁から 3m、12 月 5 日は壁から 5m、12 月 6 日は壁から 7m の場所に設置した。なおマルチパス誤差の 0 平均及び平均値考慮の処理は 15 時間のデータを 30 分間ごとのデータに区切って評価した。表 2 に各 DGPS 測位結果を、左から高度、水平方向の標準偏差値、さらに高度方向については全ての時間帯の結果の平均値を示した。高度方向の真値は 80.98m であった。真値は基準局のアンテナ位置から屋上の高度を計算し、その高度に移動局のアンテナ高を足したものと計算した。キャリアスムージングは 100 秒とした。表 2 の結果より、壁からの距離が近いほど可視衛星数が減少するため高度、水平方向の精度が悪化している。MP 推定をしないときよりも、MP 推定を行ったほうが高度、水平方向の精度が大幅に向上している。また 0 平均によるマルチパス誤差推定よりも、平均値を考慮したマルチパス誤差推定の結果のほうが、測位誤差が 1/5 程度減少していることが確認された。12 月 5 日のアンテナ - 壁間が 5m のときの高度方向の精度が表 1 の結果よりも悪い理由は、表 1 の結果は、1 日の中でも可視衛星数の多い時間帯のデータを利用していることと、その時間帯のマルチパス波の多くが比較的シミュレーションの結果に近い鏡面反射をしていたた

表 2 MP 推定方法による DGPS 測位精度の違い
Table 2 DGPS accuracy on MP estimation methods

アンテナ - 壁間 (3m)	高度	水平	高度平均
MP 推定なし	1.12m	0.76m	81.22m
MP 推定 (0 平均)	0.57m	0.25m	81.21m
MP 推定 (平均値考慮)	0.40m	0.22m	81.18m
アンテナ - 壁間 (5m)	高度	水平	高度平均
MP 推定なし	0.79m	0.60m	81.18m
MP 推定 (0 平均)	0.26m	0.25m	81.36m
MP 推定 (平均値考慮)	0.22m	0.20m	81.13m
アンテナ - 壁間 (7m)	高度	水平	高度平均
MP 推定なし	0.70m	0.55m	81.09m
MP 推定 (0 平均)	0.27m	0.23m	81.19m
MP 推定 (平均値考慮)	0.19m	0.17m	81.05m

めであると考えられる。高度方向の平均値は全体的に真値よりも少し高い値となっており、0 平均の MP 推定の場合に他の場合よりも少し真値からずれる傾向にあった。以上の結果は、近傍に障害物が存在する場合でも、マルチパス環境の良い場所での DGPS 測位精度と同等の精度を得ることができることを示しており、鏡面反射を考慮するとある程度マルチパス誤差を推定することが可能であることがわかった。

7. 結 論

GPS アンテナに近接してコンクリートの壁が存在する場合の反射及び回折等のマルチパスの影響について調査した。その結果、壁による鏡面反射については、従来の搬送波位相とコード位相の差を利用した技術によるマルチパス誤差と幾何学的配置関係から計算したマルチパス誤差の値がバイアス分を除きほぼ一致することが明らかになった。そしてそれらの値を利用してマルチパス推定及びキャリアスムージングを行うと、DGPS 測位の高度方向の誤差が 1/10 以下となった。さらに 0 平均としてマルチパス誤差を推定するよりも、マルチパス平均値を考慮して推定したほうが、測位誤差が 1/5 程度減少することを確認した。また回折により信号強度が減少することが確認されたが、信号強度の最低推奨値が確保されていればコード位相に対する大きな誤差要因にはならないことを確認した。周囲の障害物とアンテナの幾何学的な関係が既知である補正データ生成用の基準局に対して、本手法のマルチパス誤差推定を適用することにより、より正確な補正値を算出することが可能であるといえる。本論文では、マルチパス誤差を後処理により推定したが、実際の移動体でのサービスでは予測不可能なマルチパス波を受け

ることになる。よってリアルタイムでマルチパス波を推定できるようにすることが今後の課題である。

謝辞 実験に協力頂いた茨城工業高等専門学校の岡本修氏と学生方、オープンフューチャーシステム(株)の内田雅之氏に感謝します。

文 献

- [1] Van Dierendonck, A.J., Fenton, P. and Ford, T., \Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver," Navigation, Journal of the Institute of Navigation, USA, Vol.39, No.3, Fall 1993, pp.265-283.
- [2] B. Townsend, D.J van Nee, P. Fenton, and K. Van Dierenconck, \Performance Evaluation of the Multipath Estimating Delay Lock Loop," ION GPS-94, Salt Lake City, September 1994.
- [3] L. Garin, Dr. F. van Diggelen, J.M. Rousseau, \Strobe & Edge Correlator { Multipath Mitigation for Code," ION GPS-96, Kansas City, KS, September 17{20,Part1, pp.657{664.
- [4] Kee, C. and Parkinson, B. W., \Calibration of Multipath Errors on GPS Pseudorange Measurements," ION GPS-94.
- [5] K. Breivik and B. Forssell, \Estimation of Multipath Error in GPS Pseudorange Measurements," Navigation, Journal of the Institute of Navigation, USA, Vol.44, No.1, Spring 1997.
- [6] Ray, J. K., \Mitigation of GPS code and carrier pahse multipath e@ects using a multi-antenna system," Ph.D. dissertation, Department of Geomatics Engineering, The University of Calgary, Calgary, Alberta, Canada, March 2000.
- [7] 久保 信明, 安田 明生, \単独測位におけるマルチパスの評価と精度改善方法," 信学論 (B), Vol. J84-B NO.12, pp.2123{2131, December 2001.
- [8] Braasch, M.S., \Chapter14, Multipath E@ects, in Global Psitioning System: Theory and Aplications," AIAA, Washington,DC, 1996.
- [9] P. Misra, P. Enge, \Chapter8, Signal-to-Noise and Ranging Precision, Global Psitioning System, " Ganga-Jamuna Press, Lincoln,Massachusetts, 2001.
- [10] 進士昌明編, \無線通信の電波伝播," 電子情報通信学会 1992.