

衛星測位におけるマルチパス誤差の削減と高精度化への可能性について

久保 信明[†] 安田 明生[†] 鈴木 崇史[†]

[†] 東京海洋大学, 東京都

E-mail: †nkubo@e.kaiyodai.ac.jp

あらまし 高精度 GPS 測位において, マルチパス誤差の低減は, 依然として大きな障壁である. ここでは, 高精度化のために必要なマルチパス誤差の削減について述べる. マルチパス誤差の削減については, 従来のコリレータの改良と異なり, 信号強度を利用したマルチパス誤差の推定技術に着目した. さらに, その技術と従来のコリレータ技術を融合することにより, 遅延距離の短いマルチパスに対して改善が見られたので報告する.

キーワード GPS, マルチパス, 高精度測位

The Possibility of the Precise Positioning and Multipath Error Mitigation

Nobuaki KUBO[†], Akio YASUDA[†], and Takashi SUZUKI[†]

[†] Tokyo University of Marine Science and Technology, Etchujima 2-1-6, Koto-ku, Tokyo, 135-8533 Japan

E-mail: †nkubo@e.kaiyodai.ac.jp

Abstract Multipath error mitigation is still big problem in the field of precise positioning. This paper presents about the multipath error mitigation which is required for the precise positioning under 1 meters. The technique we aim at is not the improvement of correlator technique, but SNR based multipath estimation technique. In addition, by combineing this tequnique with the conventional correlator technique, the performance against not only long-delay multipath but also short-delay multipath can be improved. The performance is demonstrated by simulation.

Key words GPS, Multipath, Precise Positioning

1. ま え が き

20 世紀終わり頃に開始された衛星測位分野は, 米国の GPS の到来とともに大きく発展してきた. その間, 衛星測位の高精度化についても様々な研究開発がなされ, 多くの成果が ION (米国航法学会) 等で報告されている. その課題のなかでもマルチパス誤差の削減は, いまだに大きなテーマとなっている. DGPS 測位の 1m 以内への精度向上や, 数 cm の精度を達成するために必要な搬送波位相の整数値バイアス決定を困難にしている最大の要因は, マルチパス誤差といっても過言ではない.

現在, GPS 測位の高精度化において, 数 cm の精度を数秒以内にある程度の信頼性を保って決定するには, 可視衛星がより多く存在することと, コードのマルチパス誤差を最大でも 1m 程度に抑えることが必要である. 可視衛星数の増加は, ヨーロッパのガリレオや日本の準天頂衛星の出現によって, ある程度は達成されると予想される. また様々なコリレータやマルチパス削減手法, コードのチップレートの増加により, マルチパス誤差の大きさが改善されてきていることは事実である. 特に最新のコリレータでは, 遅延距離の長い (約 30m 程度以上) マ

ルチパス波による影響はほとんど受けていない. しかしながら, 実際には, 数 m から 10m 程度のマルチパス誤差を発生する遅延距離の短い (約 30m 程度未満) マルチパス誤差を抑制する技術開発は, 依然として課題である. 中には 1m 程度にマルチパス誤差を抑える技術も発表されているが [1], 未だ実用化はされていない.

本研究では, コードのマルチパス誤差を抑制する技術について報告する. この技術の背景にあるものは, マルチパス誤差と信号強度の強い相関性を利用したものである. 以前からマルチパス誤差と信号強度に強い相関があることはよく知られており, この事実を利用したマルチパス削減技術もいくつか発表されてきた. ここでは, そのうちの 1 つの技術 [2] を利用し, さらに改良した技術を提案する. 本研究で提案した技術を利用すると, 遅延距離が 300m 程度未満のマルチパス波に対して, マルチパス波の強さにもよるが, コードのマルチパス誤差を 2,3m 以内に抑制することが可能である. 実際に提案した技術でマルチパス誤差がどの程度改善されるのかを, シミュレーションとマルチパス環境下での生データを用いて検証した.

2. 信号強度を利用したマルチパス誤差の削減

信号強度（相関値）を利用したコードマルチパス誤差の削減手法については、これまでにいくつかの手法が提案されてきた。中でも特に、実装が容易でリアルタイム化が可能な技術の1つに前処理マルチパス誤差推定技術[2]がある。この技術は、従来のナローコリレータの技術[3]に対して、early, late, punctual 以外にさらに相関値を出力するコリレータを設けて、その相関値をマルチパス誤差推定に利用するものである。

この手法の具体的な概念について次に示す。図1にコードのマルチパス誤差と信号強度の関係を示す。マルチパス誤差はコードと搬送波位相の差より算出した。信号強度は受信機の出力(C/N_0)そのままである。図1からも明らかなように、コードのマルチパス誤差と信号強度には強い相関が見られる。信号強度を適切にスケール化し、その平均レベルを取り除くことにより、コード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る。信号強度は遅延距離の短いマルチパス誤差に対して敏感であるため、今まで取り除くことが困難であった遅延距離の短いマルチパス誤差をある程度取り除くことが可能になる。

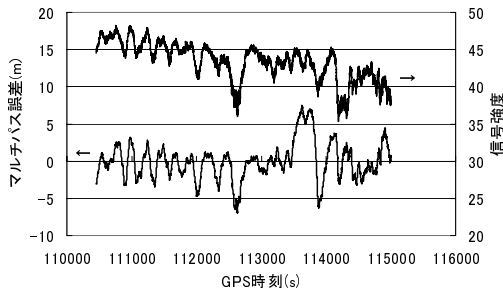


図1 マルチパス誤差と信号強度

Fig. 1 Multipath error and corresponding signal amplitude

GPS 受信機のトラッキングにおいて、信号強度の値は、punctual (0 チップとする)での相関値そのものであることが知られている(以後、信号強度と相関値は同じ意味で用いている)。よってマルチパス波が混入すると、punctual 及びそこからいくらかのチップずれた付近での相関値は当然ながら、マルチパス波の影響を受ける。図2に0.1chipのナローコリレータの場合の例を示す。振幅比が0.25、遅延が0.05chipの同相のマルチパス波が存在するときの例である。帯域制限はなしと仮定している。実際に受信機で測定する相関値は直接波とマルチパス波が混入したものである。よって0.1chipのナローコリレータを用いても、図2のようにマルチパス誤差を生み出すことになる。ここで、punctual の位置は、マルチパス波が存在する場合、すでに左右どちらかにずれていることに注意しなければならない。

表1 相関値と規格化した値

Table 1 Correlation and standardized value					
chip	-0.1	-0.05	0	0.05	0.1
相関値	1.1188	1.1813	1.23	1.1875	1.125
規格化後	1.2431	1.2434	1.23	1.25	1.25

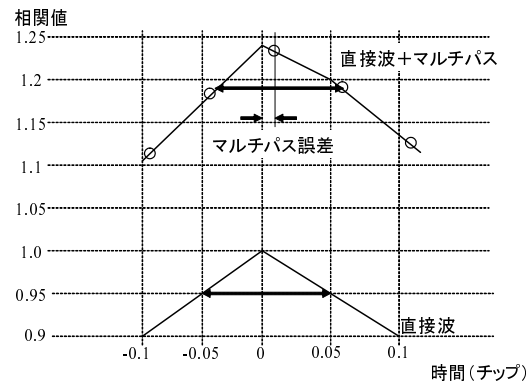


図2 ナローコリレータによるマルチパス誤差

Fig. 2 Multipath error by narrow correlator

では、受信機で測定された各 chip での相関値を利用して、どのようにマルチパス誤差を推定するかを簡単に説明する。ここでは帯域制限による相関ピーク付近のなまりを考慮して、簡単な関数で相関ピーク付近を模擬している。まず時間軸方向の各 chip ごとの相関値とその相関値を規格化した値を表1に示す。規格化は、各 chip での相関値/(1.0-chip の絶対値)の計算によって行った。ここで、規格化後の相関値を利用してマルチパス誤差を求める。規格化後の0chip及び0.1chipでの相関値をA0, A1とすると、0.1chip ナローコリレータによって生じるマルチパス誤差は次のように推定される。

$$MP = factor \times \frac{A1 - A0}{A0} \times 293.05 \quad (1)$$

ここで、factor の値は0から1の範囲で設定している。本解析では、0.5前後の値を利用している。また、あらかじめ既知なバイアスについては取り除くこととする。この計算式は、0.1chipのナローコリレータで生じるマルチパス誤差の大部分を推定するために利用されるものである。単位はmとしている。図2より、実際に生じたマルチパス誤差を計算すると、約2.9mであった。上記の推定値として計算された値は、約2.3mであった。遅延距離が約15m(0.05chip)付近のマルチパス誤差にも関わらず、ある程度推定できていることがわかる。これまでは、遅延距離が0.05chipのマルチパス波のみの結果を示してきたが、遅延距離が変化した場合に、どの程度マルチパス誤差を推定できているのかを図3に示した。1式において、A0をpunctualでの値、A1を0.075chipでの値としている。振幅比は0.25で、遅延距離が0chipから1chip程度まで変化した場合の結果を比較している。マルチパス波が直接波に対して同相と逆相の場合のみ計算している。実線で示した結果が0.1chipナローコリレータによって生じるマルチパス誤差である。薄色線で示した結果が相関値を利用して推定したマルチパス誤差である。遅延距離が20m未満程度では、誤差1m程度でほぼ一致していることがわかる。

以上より、この信号強度を利用したマルチパス誤差推定法を用いると、今まで困難であった遅延距離の短いマルチパス誤差を低減することが可能となる。実際に移動体でGPSを利用する場合、遅延距離が20m以内程度の影響を受けていることが

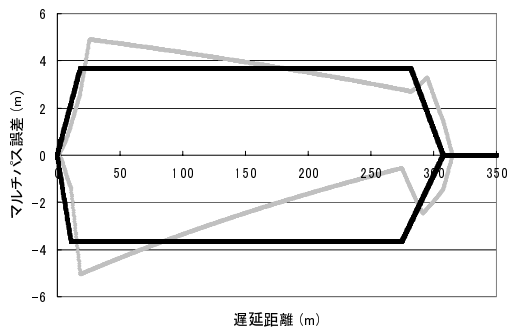


図3 実際のマルチパス誤差と信号強度による推定値
Fig.3 Multipath error and SNR based estimation

多いを考えると、このマルチパス誤差推定方法は有用であるといえる。次の節で実際の実験結果を示す。

3. 実験結果

前節で述べた、信号強度を利用したマルチパス誤差の低減が、実際にどの程度効果があるのかを検証する実験を静止データと歩行データを用いて行った。次の2通りの検証を行った。1点目は、コードと搬送波位相の差より算出したマルチパス誤差と比較すること。コードと搬送波位相の差の0平均値は、コードのマルチパス誤差にほぼ等しいことが知られている[4]。2点目は、実際に推定したマルチパス誤差を利用したときに、DGPS測位誤差がどの程度低減されるかを確認した。

3.1 静止データによる実験結果

2004年6月18日に東京海洋大学の大学院棟のそばでGPSデータを取得した。使用受信機は、基準局、移動局ともにNovAtel社製のOEM3(0.1chipナローコリレータ)とした。さらに複数の相関値を出力する機能を持つSQM(Signal Quality Monitoring)受信機を移動局に設置した。ただし、SQM受信機において、複数の相関値を出力できるチャンネルは2つなので、2衛星のみの推定を行うことになる。基準局と移動局の基線長は、大気圏の影響を避けるため1km以内とした。使用アンテナは、基準局がグランドプレーン付の測量用アンテナ、移動局も測量用に用いられるNovAtel社製GPS702とした。遅延距離の短いマルチパスの影響を受けやすくするために、5階建ての大学院棟から10m程度離れた場所に移動局用のアンテナを設置した。

図4にマルチパスを強く受けていた30番衛星の結果を示す。実線は、OEM3受信機の実データを用いてコードと搬送波位相の差より算出したマルチパス誤差を表す。薄線はSQM受信機の複数の相関値データを用いることにより推定したマルチパス誤差を表す。やはずれている時間帯も見られるが、大半の時間帯において、リアルタイムで良く推定できていることがわかる。障害物が近接し、反射面が平らで大きいため、マルチパス誤差が10mに達している部分も見られた。

図5に、推定したマルチパス誤差で擬似距離を補正した場合のDGPS測位結果と補正なしのDGPS測位結果を示す。補正

なしの結果を見ると、短基線のDGPS測位にも関わらず、マルチパスの影響を非常に強く受けていることがわかる。通常、周囲がある程度開けている場所での2drms値は、2m以内であるが、ここでは6mに達している。補正後の結果を見ると、依然としてマルチパスの影響が残っているものの、2drms値が4mまで低減されている。この補正結果は、SQM受信機のチャンネル数の制限により、2つの衛星のみの擬似距離を補正したものであるため、全ての衛星に対して補正を行うと、さらに低減されると考えられる。なおコードと搬送波位相の差より算出したマルチパス誤差を、全ての衛星に対して補正すると、2drms値が2mまで低減されることを確認している。

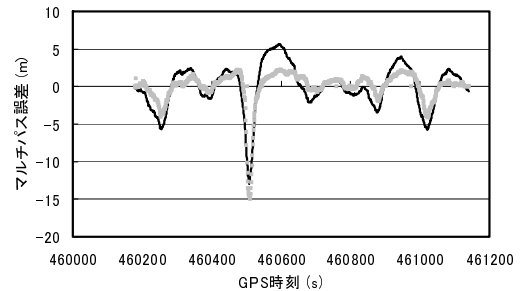


図4 30番衛星のマルチパス誤差と信号強度による推定値
Fig.4 Multipath error and estimation on PRN30

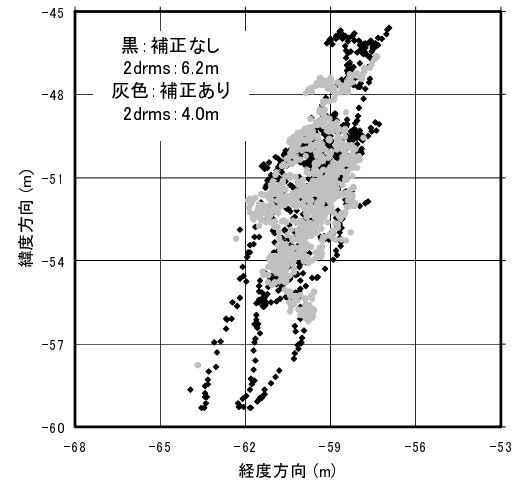


図5 DGPS測位誤差(補正ありと補正なし)
Fig.5 DGPS error and corrected DGPS error

3.2 歩行データによる実験結果

2004年6月22日に東京海洋大学の越中島会館のそばでGPSデータを取得した。使用受信機と使用アンテナは静止データを取得した場合と同じである。基準局と移動局の基線長は、大気圏の影響を避けるため1km以内とした。遅延距離の短いマルチパスの影響を受けやすくするために、越中島会館から10m程度離れた場所を、直線で15m程度、移動局用のアンテナを持って歩いた。なお直線15mを7等分して、各ポイントで30秒静止した。アンテナ周囲近接は高さ10m程度のコンクリートで

囲まれており、さらに 50m 程度離れた場所には 5 階以上の建物が並んでいる。

図 6 に、マルチパスをやや受けていた 14 番衛星の結果を示す。実線は、OEM3 受信機の生データを用いてコードと搬送波位相の差より算出したマルチパス誤差を表す。薄色線は SQM 受信機の複数の相関値データを用いることにより推定したマルチパス誤差を表す。マルチパス誤差による振幅は 1m 前後と大きくないが、ほぼ一致していることがわかる。本歩行実験では、SQM 受信機で選択した 2 つの衛星がマルチパスを強く受けておらず、推定による改善効果が望めないため、DGPS 測位結果の比較をして評価をすることが困難であった。そのため、信号強度によるマルチパス誤差の推定値の代わりに、コードと搬送波位相の差より推定したマルチパス誤差を擬似距離から差し引くことにより、DGPS 測位結果が改善されるかを検証した。

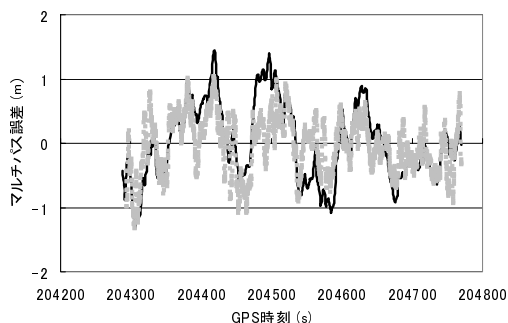


図 6 14 番衛星のマルチパス誤差と信号強度による推定値
Fig.6 Multipath error and estimation on PRN14

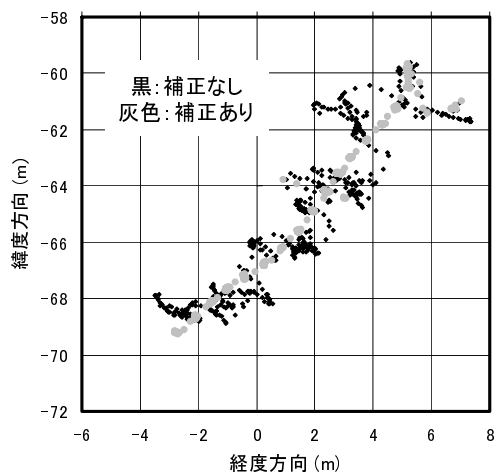


図 7 DGPS 測位誤差 (補正ありと補正なし)
Fig.7 DGPS error and corrected DGPS error

図 7 に、推定したマルチパス誤差で擬似距離を補正した場合の DGPS 測位結果と補正なしの DGPS 測位結果を示す。補正なしの結果を見ると、短基線の DGPS 測位にも関わらず、マルチパスの影響を強く受けていることがわかる。直線を歩いているにも関わらず、横方向に 2m 程度ずれている部分が多く見受けられる。次に、補正後の結果を見ると、プロット位置がほ

ぼ直線を示しており、マルチパス誤差が低減されていることが明瞭である。本歩行実験では、信号強度の値から推定したマルチパス誤差を利用することができなかったが、コードと搬送波位相の差より算出されるマルチパス誤差は、信号強度より推定したものとほぼ一致しているため、同じように改善した結果が得られると考えられる。

4. 新たなマルチパス誤差低減方法の提案

前節までに、信号強度を利用したマルチパス誤差推定が、遅延距離の短い (20m 未満程度) マルチパス誤差に対して有効であることを示してきた。図 3 より、遅延距離が 20m から伸びてくると、マルチパス誤差を余分に推定していることがわかる。ここで、20m よりも長い遅延距離のマルチパス波を対処することが可能かどうかを検討した。図 8 に、再度 0.1chip のナローコリレータによるマルチパス誤差と 0.075chip の相関値より推定したマルチパス誤差のプロファイルを示す。式 1 において、 A_0 は punctual における相関値、 A_1 は 0.075chip における相関値として計算している。遅延距離が約 80m 以降に伸びるにつれて、逆相側の推定値が実際の誤差よりも小さくなる傾向にあることがわかる。さらに図 9 に、0.1chip の strobe-correlator [5] の遅延距離対マルチパス誤差の関係図を示す。振幅比は 0.25 として計算している。図 8、図 9 を見ると、遅延距離が短い 80m 程度までは、図 8 の信号強度によるマルチパス誤差推定方法を用いて、80m 程度以上になると、図 9 の strobe-correlator による長所 (遅延距離が 30m 以上のマルチパス波に対して影響を受けない) を用いるのが良いことがわかる。もし、遅延距離が 80m 程度以上であるか以下であるかを検知できれば、この両者の技術を結合することにより、実用的な遅延距離 (300m 以内) に対して、マルチパス誤差を 1m 程度に抑制することが可能となる。

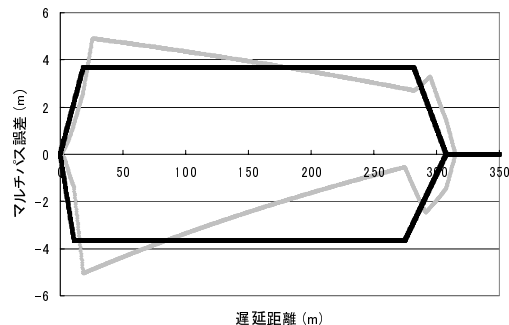


図 8 実際のマルチパス誤差と信号強度による推定値
Fig.8 Multipath error and SNR based estimation

そこで、遅延距離が 80m 程度以上のマルチパス誤差をほぼ低減できる能力をもつ strobe-correlator と、この信号強度による推定技術を結合することを新たに提案した。この 2 つの技術を結合する際に問題になるのは、マルチパス波の遅延距離をリアルタイムで検出することが困難な点である。この問題を解決するために、ここでもマルチコリレータによる相関値を利用する。以下にその概要を説明する。1chip は 293.05m とする。リア

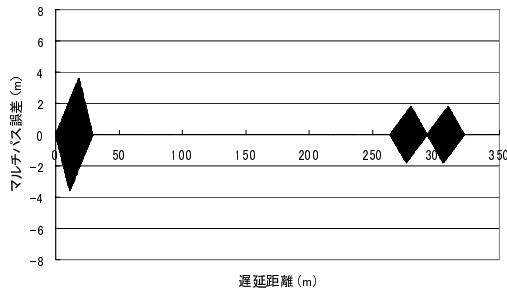


図 9 0.1chip strobe-correlator によるマルチパス誤差
Fig.9 Multipath error on the 0.1chip strobe-correlator

リアルタイムに 0.025chip ごとの相関値を出力する受信機があると仮定する。各相関値において、0chip における相関値から、その相関値の 1 つ右側の相関値を引いた値を記録する。この操作を 0chip から 1chip まで行くと、全部で 40 個の値を得る。この 40 個の値を観察すると、マルチパスが直接波の相関値に影響を与えている場合は、必ずそのマルチパス波の遅延距離をまたいだ付近で、値の飛びのような変動がみられるはずである。具体的には、マルチパス誤差がマイナス側に影響する場合は上から下への変動、マルチパス誤差がプラス側に影響する場合は下から上への変動が見られる。図 10 に、遅延距離が 70m、振幅比が 0.25 の同相のマルチパスが存在する場合の 0chip から 1.0chip までの相関値と隣同士の相関値の差（相関値の変化率）の結果を示す。薄色線が相関値、実線が相関値の変化率を示す。実線の結果より、0.225chip から 0.25chip の地点で飛びが明らかである。これは遅延距離が 80m 以下のマルチパスが支配的であることを示しており、検知可能であると思われる。同様に、図 11 に逆相の結果を、同条件で遅延距離が 90m の場合の結果を図 12, 13 に示す。いずれも相関値の変化率のみ示した。図 11 より、逆相の場合も 0.225chip から 0.25chip にかけて飛びが見られる。図 12, 13 より、遅延距離が 90m の場合は、同相、逆相ともに 0.3chip から 0.325chip にかけて飛びが見られ、80m 以上のマルチパスが支配的であることがわかる。

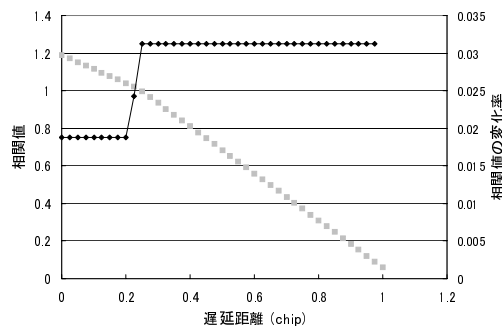


図 10 マルチパス下での相関値と相関値の変化率（70m 遅延，同相）
Fig.10 Correlation and correlation rate under multipath condition

なお、0chip 周辺における相関値は、実際には帯域制限の影響により必ずなまっているため、その値は利用しないことにす

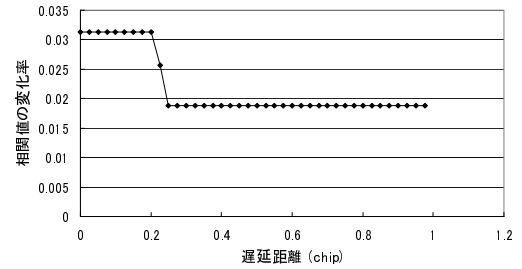


図 11 マルチパス下での相関値と相関値の変化率（70m 遅延，逆相）
Fig.11 Correlation rate under multipath condition

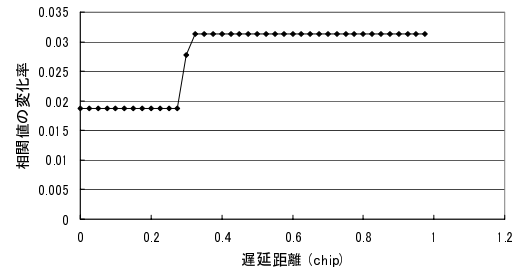


図 12 マルチパス下での相関値と相関値の変化率（90m 遅延，同相）
Fig.12 Correlation rate under multipath condition

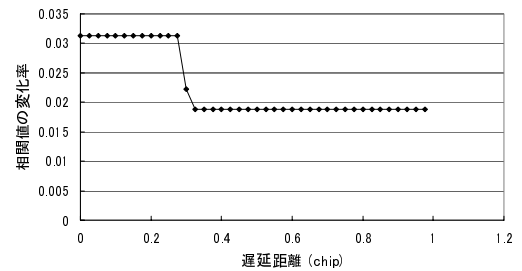


図 13 マルチパス下での相関値と相関値の変化率（90m 遅延，逆相）
Fig.13 Correlation rate under multipath condition

る。さらに、上記の方法の弱点は、マルチパス波の振幅が小さいときに検出困難になることと、複数のマルチパス波がある場合、マルチパス波の遅延距離を検知するための閾値を設定することが困難になることである。1 点目の振幅が小さい場合は、マルチパスによる影響が小さいということを意味するので、遅延距離を見分けることは行わず、strobe-correlator で擬似距離を出力する。振幅比が 0.1 未満の場合、strobe-correlator を利用すると、マルチパス誤差を 1m 程度に抑制することが可能である。2 点目の複数のマルチパス波がある場合は、最も変動の大きい部分を遅延距離の検出に利用することにする。

本節では、マルチパス誤差低減のための新たな手法について述べてきた。もし擬似距離誤差に支配的なマルチパス波の遅延距離をリアルタイムで検知できたとすると、マルチパス波の遅延距離が実用的な範囲内において、コードのマルチパス誤差を 1m 以内に低減することが可能である。

5. ま と め

コードのマルチパス誤差の低減について、信号強度を利用した方法について述べてきた。実際の静止と歩行のデータより、リアルタイムで今まで困難であった遅延距離の短いコードの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。今回、マルチコリレータの出力が2チャンネルに制限されていたため、選択した2衛星のみで擬似距離に対してマルチパス誤差の補正を行い、DGPS 測位誤差の改善をみることができた。さらにこの技術と strobe-correlator の技術を結合することにより、マルチパスの大きい悪条件下においても、DGPS 測位において、 1σ で1m 程度を達成することが可能であることを示すことができた。ただし、マルチパス波の遅延距離を検知することが必要になる。本報告では、1つの検知方法を提案したが、引き続き信頼性を上げるために改良する必要があると考えられる。

謝辞 本報告で使用した SQM 受信機は、独立行政法人電子航法研究所殿より拝借したものである。また、SQM 受信機の使用に際し、製造元の古野電気（株）のエンジニアの方より助言をいただきました。関係各位に謝意を表します。

文 献

- [1] L.R.Weill, "Multipath Mitigation Using Modernized GPS Signals: How Good Can it Get?," Proceedings of ION GPS 2002, Portland OR, September, 2002, pp. 493-505
- [2] J.Sleewaegen, F.Boon, "Mitigating Short-Delay Multipath: a Promising New Technique," Proceedings of ION GPS 2001, Salt Lake City, September, 2001, pp. 204-213
- [3] Van Dierendonck, A. J., P. Fenton, T. Ford, "Theory and Performance of Narrow Correlator Spacing in a GPS Receiver," Navigatoin, Journal of The Institute of Navigation, Vol.39, No.3, pp.265-283, Fall 1992
- [4] 久保信明, 安田明生, "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," 信学論 (B), Vol.J86-B, no.1, pp.104-112, Jan. 2003
- [5] L.Garin, J.M.Rousseau, "Enhanced Strobe Correlator Multipath Rejection for Code & Carrier," Proceedings of ION GPS 1997, Kansas City MO, September, 1997, pp. 559-568