

21. 測距誤差推定によるGPS劣化信号検出について

通信・航法・監視領域 ※齊藤 真二、福島 莊之介、吉原 貴之、藤井 直樹

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) 衛星の故障などにより信号波形の劣化が発生すると、GPS 受信機内でGPS衛星からの信号を捕捉するために用いるC/Aコードと受信信号との相関波形に歪みが生じ、大きな測距誤差をもたらす原因となる。このような受信機相関波形に歪みが生じた事例として、1993年に発生したSVN19衛星のRF回路故障に伴う送信波形の劣化による19番衛星問題[1]が知られている。この19番衛星の信号劣化では、異機種間でのDGPS (Differential GPS) 測位に数10mもの測位誤差が生じたことが報告されている。

電子航法研究所において開発しているGBAS (Ground Based Augmentation System; 地上補強型衛星航法システム) やSBAS (Satellite Based Augmentation System; 衛星補強型システム) などのGNSS (Global Navigation Satellite Systems; 地球航法衛星システム) を用いた航空機の航法システムでは、高い信頼性が求められるため、このような衛星信号の劣化を検知し警報を発するSQM (Signal Quality Monitoring; 信号品質監視) 機能をシステムに組み込むことが必要とされている。

筆者らは、このSQM機能を実現するためにGPS信号の相関波形を取得可能なGPS信号品質監視装置 (SQM受信装置) を開発し、さまざまな環境における信号取得の結果について報告してきた[3, 4]。本発表では、本装置の概要を述べ、本装置で得られる相関波形を用いGPS信号歪みを検出する方法として、測距誤差推定による劣化信号検出について試行結果を報告する。

2. SQM受信装置

一般的なGPS受信機では、GPS衛星毎に異なるPRN符号(C/Aコード)で変調された信号を捕捉するために、受信機内でC/Aコードを生成し受信信号との相関波形のピークを追尾することで、GPS衛星信号を捕捉している(図1)。基本的に相関波形はピークを中心として対称であ

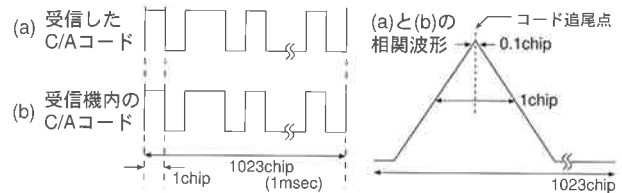


図1: GPS信号(C/Aコード)と相関波形

るため、アーリーレイトコリレーションを用いたGPS受信機では、相関器ペアの出力が同レベルとなるところの中心を追尾点とし、測距を行っている。この相関器ペアのchip幅は受信機の機種により、相関器ペアの幅を1chipとしたワイドコリレータ、0.1chipとしたナローコリレータなどがある。また、他にダブルデルタコリレーションと呼ばれる相関波形の傾きにより追尾する方法などもある。

GPS衛星においてC/Aコードの生成・変調の過程で何らかの故障により送信信号に劣化が発生した場合、GPS受信機での相関波形に歪みが生じ測距誤差の原因となる。ここで生じる測距誤差は相関器幅などにより異なるため、特にDGPS利用者において、基準局と異なる機種を使用している場合、大きな測位誤差を生じる原因となる。SQM機能で検出すべき劣化信号のモデル(脅威モデル; threat model)として、SARPs[2]では次の3種のモデルが定義されている。

modelA : クロックタイミングのずれなどのデジタル回路の故障

modelB : 増幅部・送信部などのアナログ回路の故障

modelC : modelAとmodelBの複合

modelAとmodelCのデジタル部の故障によるC/Aコード信号の立上りの遅延は Δ [chip]で表され、また、modelBとmodelCのアナログ部の故障については、 $t=0$ で信号が立ち上がるとすると劣化信号 $e(t)$ は次式で表される。

$$e(t) = \begin{cases} 0 & t \leq 0 \\ 1 - \exp(-\sigma t) \left[\cos \omega_d t + \frac{\sigma}{\omega_d} \sin \omega_d t \right] & t \geq 0 \end{cases}$$

表 1: 劣化信号モデルパラメータの定義範囲

model	Δ [chip]	f_d [cycle/chip]	σ [nepers/chip]
A	-0.12 - 0.12	—	—
B	0	4.0 - 17	0.8 - 8.8
C	-0.12 - 0.12	7.3 - 13	0.8 - 8.8

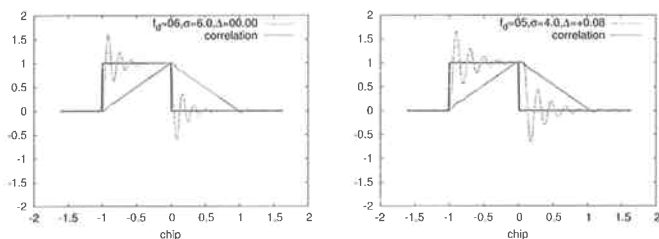


図 2: 劣化信号と相関波形 (モデル B, C)

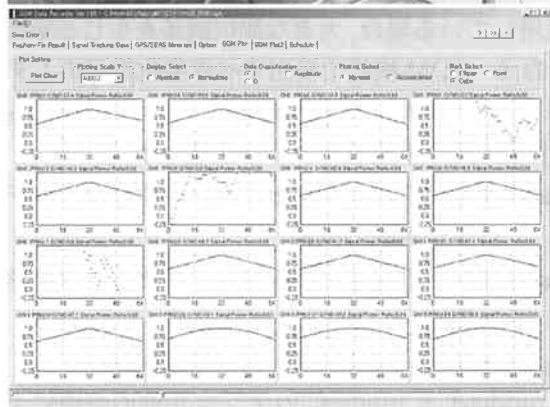


図 3: (上) SQM 受信装置 (ラック中段)
(下) 相関波形表示画面例

各パラメータ値は表 1 に示す範囲とされ、ここで $\omega_d = 2\pi f_d$ である。図 2 に $f_d = 6$, $\sigma = 6$ とした時の model B (左), $f_d = 5$, $\sigma = 4$, $\Delta = 0.08$ とした時の model C (右) の劣化波形および相関波形の例を示す。

このような GPS 信号の劣化を検出し、品質監

表 2: SQM 受信装置概要

受信周波数	L1(1575.42MHz)
GPS 受信チャンネル数	13 チャンネル
SBAS 受信チャンネル数	3 チャンネル
最大 SQM チャンネル数	16 チャンネル
最小 SQM サンプル間隔	0.0127875chip (80MHz)
最大サンプル数	257 点/SQMch

視機能を実現するために、相関波形が取得可能な SQM 受信装置 (図 3) を開発した。この装置は、GPS/SBAS 受信機をベースとしており、捕捉・追尾している GPS 衛星または SBAS 衛星のうち最大 16 個の衛星を SQM チャンネルに割り当て、相関器出力を最大 80MHz (12.5nsec, 0.0127875chip 毎) でサンプリングし、最大 257 点の相関器出力 (I 相および Q 相) レベルをデジタルデータとして 200msec 毎 (5Hz) で出力する機能を持っている。また、取得開始点はコード追尾点から $-1023 \sim 1023$ chip の範囲において 0.0127875chip ステップで指定可能となっている。SQM 受信装置の概要を表 2 に示す。

3. 測距誤差推定方法

信号劣化が DGPS 測位に影響を及ぼすのは、基準局受信機と利用者側の受信機において測距誤差が大きく異なる場合である。そこで、異なる受信機間で測距差が大きくなるような劣化信号の検出を目的とし、SQM 受信装置により取得できる複数の相関値から測距誤差を推定する方法を提案する。

図 4 のように SQM 受信装置の追尾点 (I_p) と想定する相関器の追尾点が Δt [sec] だけずれて

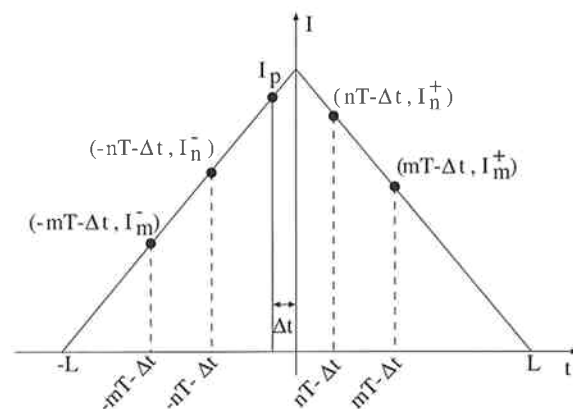


図 4: 各点の相関値

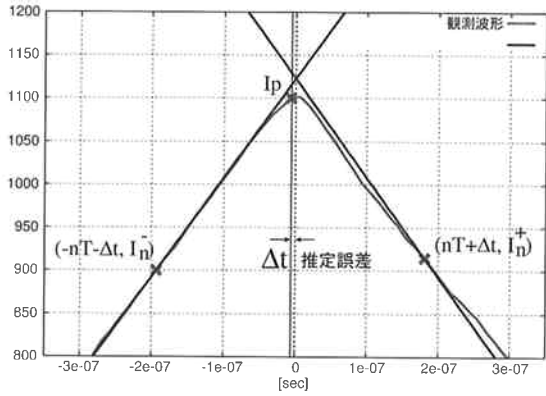


図 5: 手法 1

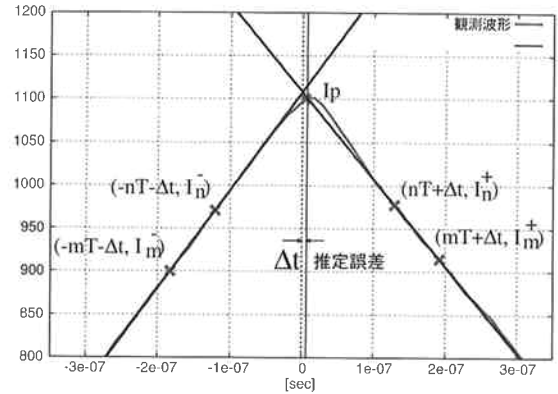


図 6: 手法 2

いる場合を考える。SQM 受信装置の追尾点を基準とすると、測距誤差は $\Delta t \cdot c$ と表される。各変数の定義は以下のとおりとする。

I_n^+ : 追尾点 (I_p) より n 点後の相関値

I_n^- : I_p より n 点前の相関値

I_m^+ : I_p より m 点後の相関値

I_m^- : I_p より m 点前の相関値

T : 相関値サンプリングレート [sec]

1/80 μsec

L : C/A コード 1chip に相当する時間 [sec]

1/1.023 μsec

$\Delta t \cdot c$: 推定測距誤差 [m] (想定する相関器の追尾点と SQM 受信装置の追尾点との差)

c : 光速 [m/s]

手法 1 入力波形が歪んでいない場合は、追尾点 I_p より n 点前の点 $(-nT - \Delta t, I_n^-)$ と $(-L, 0)$ を通る直線と n 点後の点 $(nT - \Delta t, I_n^+)$ と $(L, 0)$ を通る直線の交点が相関値のピークとなり、追尾点 I_p と一致する。しかし、波形が歪んでいる場合は差が生じ、その測距差 $(\Delta t \cdot c)$ を以下の式で推定する (図 5)。

$$\Delta t = \frac{(I_n^+ - I_n^-)}{(I_n^+ + I_n^-)} \cdot (L - nT)$$

手法 2 入力波形が歪んでいない場合は、 $(nT - \Delta t, I_n^+)$ と $(mT - \Delta t, I_m^+)$ を通る直線と $(-nT - \Delta t, I_n^-)$ と $(-mT - \Delta t, I_m^-)$ を通る直線の交点が相関値のピークとなり、追尾点 I_p と一致する。しかし、波形が歪んでいる場合は差が生じ、このときの Δt は以下の式で推定する (図 6)。

$$\Delta t = \frac{n(I_m^+ - I_m^-) - m(I_n^+ - I_n^-)}{(I_m^+ + I_m^-) - (I_n^+ + I_n^-)} \cdot T$$

手法 1 は $2nL/T$ [chip] 幅のアーリーレイトコリレータ、手法 2 は $2nT/L$ [chip] 幅と $2mT/L$ [chip] 幅の相関器を持つダブルデルタコリレータを模擬している。

4. 推定結果例

これらの手法によりマルチパスを含む信号において、測距誤差 $(\Delta t \cdot c)$ を推定した例を図 7 に示す。上図は、高度約 250m で仰角約 6 度の衛星を航空機上で受信した時の相関波形で、海面反射によるマルチパスが重畳している。下図が、このとき本手法により推定した例で、EL-0.1 は

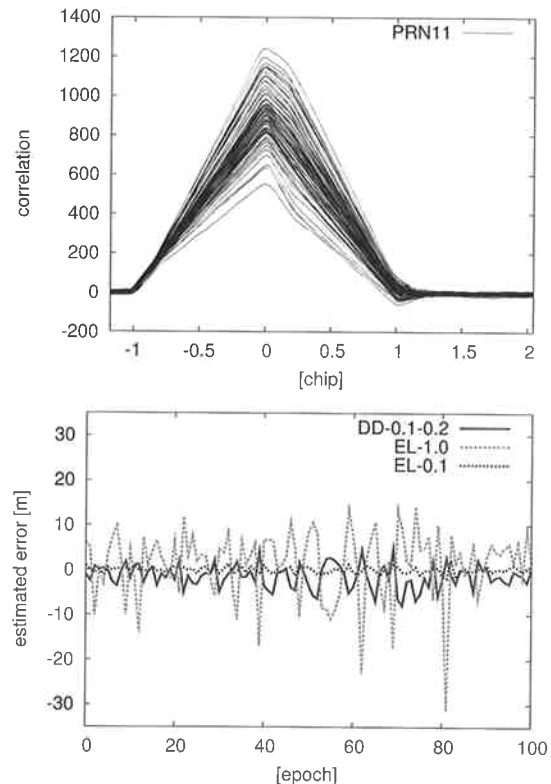


図 7: 取得相関波形と推定誤差の例 (マルチパス)

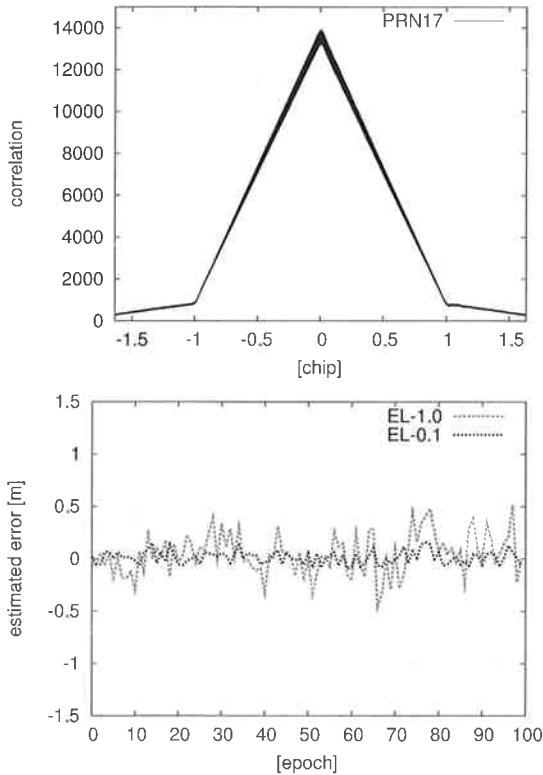


図 8: 取得相関波形と推定誤差の例

手法1において相関器幅 0.1023chip (ナローコリレータを想定), EL-1.0 は手法1において相関器幅 1.023chip (ワイドコリレータを想定) とした例である。また, DD-0.1-0.2 は 0.1023chip と 0.2046chip の場合の手法2の例である。ワイドコリレータを想定した EL-1.0 の場合, 推定された測距誤差は 1σ で 4.5m であったが, EL-0.1 の場合は, SQM 受信装置の GPS 受信部の相関器幅 (0.1chip) とほぼ等しいため差は小さく 1σ で 0.8m 程度となった。雑音の少ない信号のとき同様の手法で推定した例を図8に示す。このとき, EL-1.0 は 1σ で 0.20m, EL-0.1 は 1σ で 0.06m であり, 推定誤差がマルチパスによる影響で増大していたことがわかる。

さらに, 図2で示した modelC ($f_d = 5, \sigma = 4, \Delta = 0.08$) の場合について推定をおこなった。手法1で $n = 15(0.384\text{chip})$ とした場合の例を図9に示す。手法2で $n = 10(0.25575\text{chip}), m = 15(0.384\text{chip})$ とした場合の例を図10に示す。この例では, 手法1で $\Delta t \cdot c = 3.55\text{m}$, 手法2で $\Delta t \cdot c = 10.7\text{m}$ となった。このようにして, 様々な劣化信号パラメータおよび n, m 値に対し $\Delta t \cdot c$ 値を求め, 劣化信号検出に適した n, m

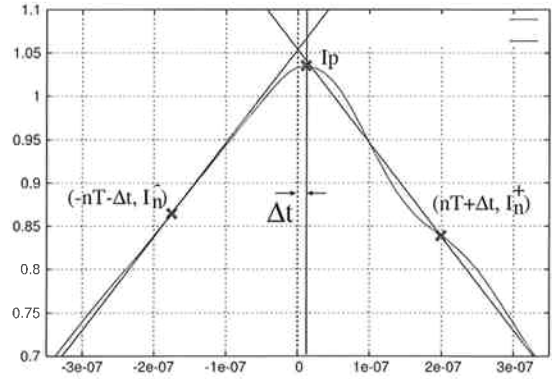


図 9: 手法 1

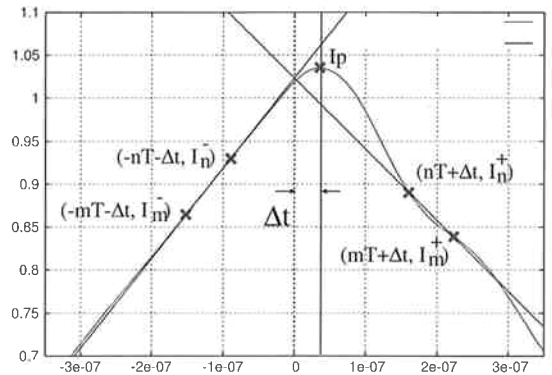


図 10: 手法 2

の値としきい値を決定する。

5. まとめ

DGPS 測位では, GPS 受信機の相関器の種類により測距誤差が異なる場合, 充分な補正が出来ず問題となるが, このような問題の原因となる GPS 信号の歪みの検出に本手法の目指す測距誤差推定は有効であると考えられる。

今後, より正確な測距誤差推定手法を検討するとともに, 実信号あるいは擬似信号を用いた評価を行い, 劣化信号検出のしきい値の決定などを行う。

参考文献

- [1] C. Edgar et al.; "A Co-operative Anomaly Resolution on PRN-19," Proc. ION-GPS99, Sept. 1999.
- [2] ICAO; international Standards and Recommended Practices, Annex 10, Volume I, Attachment D, ICAO, Nov. 2001.
- [3] 齊藤 他; "相関波形による GPS 信号品質監視," 信学技報 SANE2005-92, Jan. 2006.
- [4] 齊藤 他; "劣化 GPS 信号モデルによる SQM シミュレーション," 信学ソ大, Sept. 2006.