

GPS 信号品質監視装置における異常信号検出

航空システム部

齊藤 真二, 福島 荘之介, 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 受信機の相関波形に歪みが生じ, 大きな測位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 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; 地上補強型システム) や SBAS (Satellite Based Augmentation System; 衛星補強型システム) などの GPS 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 GPS 衛星の故障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, ICAO (International Civil Aviation Organization; 国際民間空機関) の SARPs (International Standards and Recommended Practices; 国際標準方式) [2] に採択されている.

筆者らは GPS 信号の品質監視を実現する SQM 機能を開発する上で必要な GPS 信号の相関波形が取得可能な, GPS 信号品質監視装置 (SQM 受信装置) を開発した [3]. まず, 開発した SQM 受信装置と電気通信大学菅平宇宙電波観測所の衛星追尾システムにより GPS 信号の相関波形の試験観測を行い, 信号品質監視での信号劣化検出の基本となる GPS 信号の相関波形などを取得した [4]. また, マルチパスに対する SQM 受信装置の振舞いを調査するため, 海面による強い反射波が重畳する環境において相関波形を取得した. さらに, 異常信号の検出方法について検討を行うため, 任意波形発生装置により擬似劣化 GPS 信号を発生させ, 相関波形の形状の変化などを調査したので, その結果について報告する.

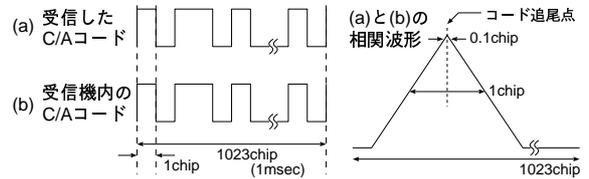
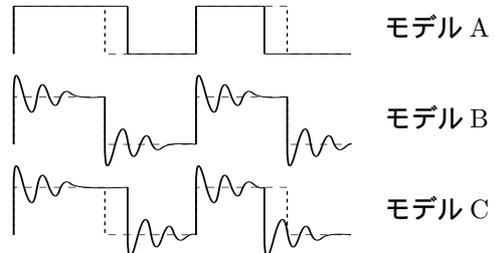


図 1: GPS 信号 (C/A コード) と相関波形

表 1: 3 つの Threat Model

A	GPS 信号の立ち下りの遅れ (進み)
B	振幅変動と減衰
C	A・B の組合せ



実線: 劣化信号, 破線: 正常信号

図 2: 3 つの Threat Model の示す波形

2 SQM 受信装置

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対称であるため, 一般的な 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. 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, 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もある.

GPS 衛星における 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 (Differential GPS) 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

表 2: SQM 受信装置概要

受信周波数	1575.42MHz (L1-C/A)
GPS 受信チャンネル数	13
SBAS 受信チャンネル数	3
SQM チャンネル数	2
SQM サンプルレート	0.025575 chip (40MHz)
サンプル数	127 / SQMch

べき GPS 不良劣化信号として ICAO の GNSS SARPs [2] では、こういった故障に対応した表 1 に示す 3 種類の Threat Model (脅威モデル) が挙げられている。それぞれの表す劣化波形を図 2 に示す。信号劣化の原因としてモデル A はクロックタイミングのずれなどのデジタル回路の故障，モデル B は増幅部・送信部などのアナログ回路の故障，モデル C は A・B の複合にそれぞれ対応している。

このような GPS 信号の劣化を検出し，品質監視を実現する SQM 機能を実現するために相関波形を取得可能な，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 衛星の内の指定された 2 個の衛星を SQM チャンネルに割り当て，相関器出力を 40MHz でサンプリングし，基本的にコード追尾点を中心とした 127 点の一定間隔 (25nsec, 0.025575 chip) での相関器出力 (I 相, 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，コード追尾点からのオフセットは $-1023 \sim 1023$ chip の範囲において 0.025575chip 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 GPS 信号相関波形

3.1 純粋な信号

開発した SQM 受信装置を用いて，相関波形の歪みの検出の基となるマルチパスなどによる信号の歪みが生じない環境におけるデータを取得するため，パラボラアンテナによる信号取得を行った。長野県小県郡真田町にある電気通信大学菅平宇宙電波観測所の衛星追尾システム (表 3, 図 4) を用いて，GPS 衛星を追尾しながら観測を行い，個々の衛星の相関波形を取得を行った。観測は，平成 15 年 3 月 23 日から 25 日と平成 16 年 3 月 11 日から 12 日に行い，合計 30 個



図 3: SQM 受信装置の外観 (ラック下段)
電気通信大学菅平宇宙電波観測所における実験時に撮影

表 3: 衛星追尾システム概要

受信可能周波数	1.4 ~ 2.6 GHz
パラボラアンテナ径	3.6 mφ
ビーム幅 (-3dB)	約 3 deg



図 4: 衛星追尾システムの外観

の GPS 衛星と SBAS 衛星 (インマルサット太平洋衛星) の相関波形データを取得することができた。

取得した相関波形 (I 相) の例を図 5 (PRN1), 図 6 (SBAS 衛星, PRN134) に示す。横軸はコード追尾点からのずれ，縦軸はコード追尾点での値で正規化した相関値である。PRN1 の GPS 衛星の例と比べ PRN134 の SBAS 衛星の相関波形は鈍った形となっている。これは，GPS 衛星の信号帯域幅 (20MHz) に比べ SBAS 衛星の送信信号帯域幅が 2.2MHz と狭いためである。このような相関波形の形状より，SBAS 衛星の捕捉

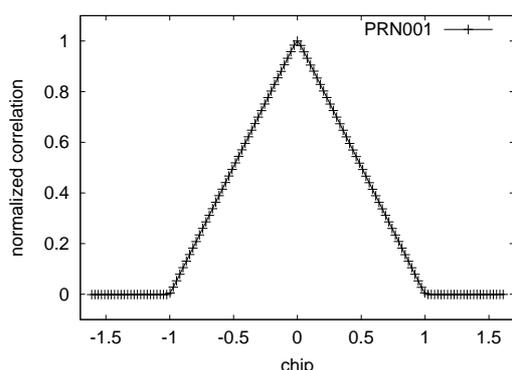


図 5: PRN1 の相関波形

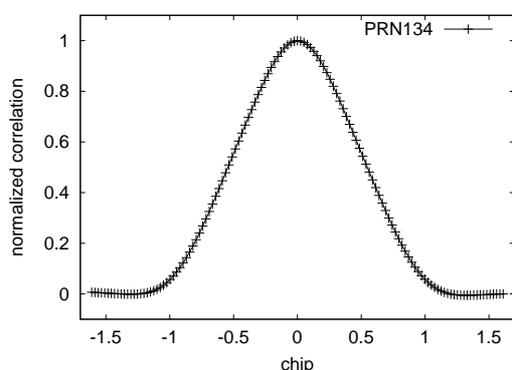


図 6: PRN134 (SBAS 衛星) の相関波形

において相関器幅が狭い場合、測距誤差が大きくなりやすいと考えられる。

筆者らが開発している GBAS では、SBAS 衛星の測距信号を利用することになっているため、劣化信号検出だけでなく、補正情報生成においても、SBAS 衛星と GPS 衛星の信号特性の違いを考慮する必要があることがわかった。また、複数の GPS 衛星により取得した相関波形の比較により、PRN 符号により相関波形の形状が異なることが確認され、これはシミュレーションによる計算結果と一致した。PRN 符号による相関波形の違いによる影響についても、今後調査する必要がある。

3.2 反射波 (マルチパス)

反射波が畳重な信号を入力した場合として、強いマルチパスの生じるアプローチ中における海面反射の信号を取得した。海面からの反射波の取得のため、実験用航空機のノーズコーン内に横向きに取り付けてある図 7 の GPS アンテナを用いた。

反射波が畳重な相関波形 (I 相) の例を図 8 に示す。この図は、縦軸を相関値としてアプロー



図 7: 実験用航空機ノーズ内に取り付けた GPS アンテナ

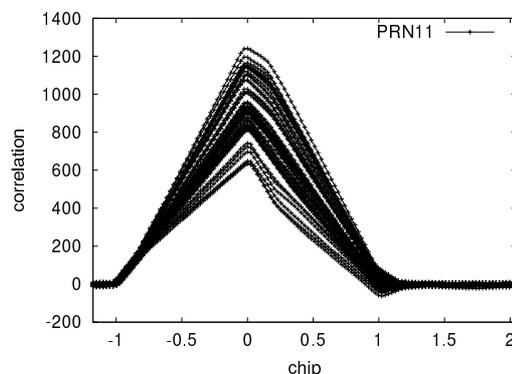


図 8: 反射波が畳重な相関波形

チ中の 10 秒間に取得したものをプロットしたものである。GPS 衛星までの距離に比べ反射点は近傍であるため、地球表面を平面と仮定すると、直接波と反射波との行路差 D は、高さ H と仰角 θ を用いて、 $D = 2H \sin \theta$ と表すことができる。図 8 のとき、衛星の仰角は約 6.0 度、飛行高度は 254m ~ 240m なので、この時の行路差を計算すると 53m ~ 50m となる。

一方、図 8 より畳重な反射波は、直接波よりおよそ 7 点遅れ、つまり、 $7 \times 0.025575 = 0.179$ chip 遅れであることがわかる。GPS 衛星の C/A コード信号は 1023chip であり、 1.023 Mc/s で送信されているので、0.179chip は $0.175 \mu\text{sec}$ に相当する。よって直接波と反射波の行路差はこれに光速を乗じ、およそ 52m と求められ、計算による結果と一致している。

このように SQM 受信装置で取得した相関波形より反射波の畳重が比較的容易に判別でき、マルチパス除去方法の開発などへの本装置の応用が考えられる。

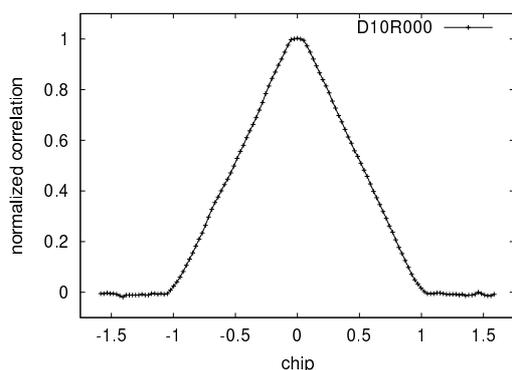


図 9: Threat モデル A

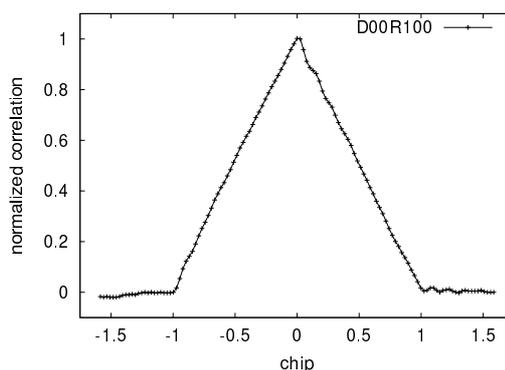


図 10: Threat モデル B

3.3 擬似劣化 GPS 信号

SARPs[2] に記述された 3 つの Threat Model (表 1, 図 2) の影響について調べるため, 任意波形発生装置 (Tektronix AWG420) とベクトルジェネレータ (HP8979A) を用い, 各モデルに対応した擬似劣化 GPS 信号を生成し, SQM 受信装置に入力した. モデル A, B, C の擬似劣化 GPS 信号を入力した場合の SQM 受信装置で取得した相関波形 (I 相) を図 9, 図 10, 図 11 に示す. 図 9 は立ち下がり を 0.1chip 遅延させた場合で, コード追尾点付近が平らになった形になり, 追尾点が本来の位置より 0.05chip ずれ, およそ 15m の測距誤差が生じている. 図 10 は矩形波の立上り, 立ち下がり後に波長 1/8chip で振動しながら減衰する信号を入力した場合で, コード追尾点付近で大きく変形しているため, 相関器幅により異なる測距誤差を持つ原因となると考えられる. 図 11 は A・B の複合で, 相関波形の形状においても二つの特徴を併せ持つ形となっていることがわかる.

このような劣化信号を判別する手法として, 相関器幅の異なる組の相関出力の比や差分により対称性を評価する方法などがある. 開発した SQM 受信装置では 127 点の相関器出力が得られるため, さまざまな幅の相関器の組み合わせによる検出手法の検討が可能である.

4 まとめ

GPS 信号品質監視機能の開発を目的とした相関波形の取得可能な SQM 受信装置を開発した. この装置により, 電気通信大学菅平宇宙電波観測所の衛星追尾システムを用いた観測により, 劣化信号検出の基となる相関波形を取得した. また, 海面反射波によるマルチパス環境での信号

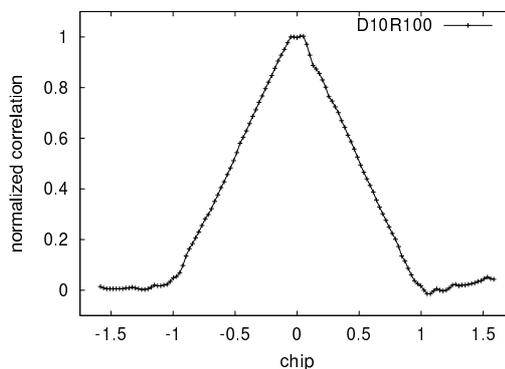


図 11: Threat モデル C

取得および任意波形発生装置による劣化信号入力時のシミュレーションを行ない, 劣化信号による相関波形を得ることができた.

今後, 開発した SQM 受信装置により, 立上り (下がり) 遅延時間や振動・減衰などのパラメータを変更した擬似劣化信号などによるシミュレーションを行い, さらに, GPS 衛星と SBAS 衛星の信号の特性の違いを考慮した劣化信号検出手法について検討・開発する予定である.

参考文献

- [1] C. Edgar, F. Czopek, Lt.B. Barker; "A Cooperative 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] 藤井, 齊藤, 橋本, 河合, 中尾; "A Real-Time GPS/SBAS Time-Divided-Multi-Signal Quality Monitoring Receiver," Proc. ION-GPS2003, Sept. 2003.
- [4] 齊藤, 福島, 吉原, 藤井, 富澤; "衛星追尾システムを用いた GPS 信号品質試験観測," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, Sept. 2003.