

16. GPS 異常信号検出モニタアルゴリズムの検討

通信・航法・監視領域 ※齊藤 真二、吉原 貴之、福島 荘之介、
齋藤 享、工藤 正博、藤井 直樹

1. はじめに

GPS (Global Positioning System) 衛星において測距信号の生成・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 受信機内で信号を捕捉するために生成したレプリカ信号と受信した測距信号と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受信機の相関器幅などにより異なるため、DGPS (Differential GPS) 測位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、特に相関器ペアの chip 幅の異なる受信機同士の場合、大きな測位誤差を生じる原因となる。このような事例として、SVN (Satellite Vehicle Number) 19 衛星の RF 回路故障により送信信号が劣化した 19 番衛星問題 [1] が知られている。

電子航法研究所において開発している GBAS (Ground Based Augmentation System; 地上型衛星航法補強システム) や SBAS (Satellite Based Augmentation System; 静止衛星型衛星航法補強システム) などの GNSS (Global Navigation Satellite Systems; 全地球的航法衛星システム) 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、このような衛星故障による異常信号を検出し警報を発するモニタとして、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、GPS 信号の品質監視機能を実現するため、相関波形が取得可能な GPS 信号品質監視装置を開発し、この装置で得られる相関波形から GPS 信号歪みを検出する方法として、異常信号により生じる測距差を推定する手法を提案 [2] し、擬似信号への適用し評価を行ってきた。本発表では、新たに検討した検出手法 [3] およびしきい値を決定する手法について述べ、実信号へ適用した結果を述べる。

2. 相関波形と信号追尾

GPS 衛星から送信される測距信号は、衛星毎に異なる PRN(Pseudo Random Noise; 疑似ラ

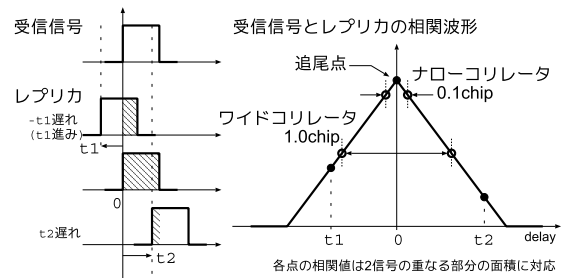


図 1: 受信信号と相関波形

ンダム雑音) 符号 (C/A コード) で変調されている。GPS 受信機では、この信号を捕捉するために、受信機内で捕捉したい衛星に対応した C/A コード (レプリカ信号) を生成し受信信号との相関値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るため、ピークの前 (アーリー) と後 (レイト) の相関器ペアの出力が同レベルとなるようにすることで、その中心を追尾点とし、測距を行うことができる。この方式はアーリーレイトコリレーションと呼ばれ、多くの GPS 受信機でこの方式が採用されている。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 1.0 chip としたワイドコリレータ、0.1 chip としたナローコリレータがある。また、アーリーレイトコリレーションの他に chip 幅の異なる 2 つのコリレータの差分を用いるダブルデルタコリレーションと呼ばれる方法などもある。

3. 衛星故障による異常信号

衛星故障による異常信号のモデル (threat model; 脅威モデル) として、ICAO (International Civil Aviation Organization; 国際民間航空機関) の SARPs (international Standards and Recommended Practices; 国際標準および勧告方式) [4] では、次に示す model A, B, C の 3 種類のモデルが定義されている。

model A : クロックタイミングのずれなどのデジタル回路の故障

model B : 増幅部・送信部などのアナログ回路

表 1: SARPs で定義されている脅威モデルパラメータの範囲

model	Δ [chip]	f_d [cycle]	σ [nepers]
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

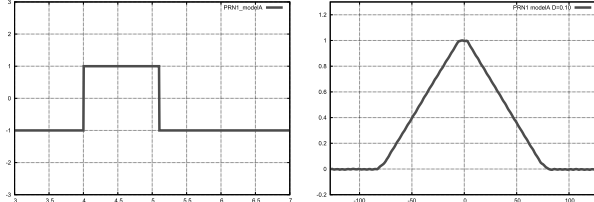


図 2: model A, $\Delta = 0.1$

の故障

model C : model A と model B の複合

model A と model C のデジタル部の故障による C/A コード信号の立ち下りの遅延を Δ [chip] で表し、本来の信号が $t = 0$ で信号が立ち下がるとすると、model A は

$$\begin{cases} 1 & t \leq \Delta \\ 0 & t \geq \Delta \end{cases}$$

と表される。また、model B と model C 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、振動成分を $\omega_d (= 2\pi f_d)$ 、減衰成分を σ とし、次式で表される。

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

なお、各パラメータ値は SARPs において表 1 に示す範囲とされている。図 2～図 4 に、開発した GPS 信号品質監視装置を用いたハードウェアシミュレーションで取得した相関波形を示す。それぞれ、 $\Delta = 0.1$ とした時の model A の信号波形と相関波形、 $f_d = 6$ 、 $\sigma = 6$ とした時の model B の信号波形と相関波形、 $f_d = 5$ 、 $\sigma = 4$ 、 $\Delta = 0.08$ とした時の model C の信号波形と相関波形である。

4. 異常信号検出

4.1 検出に使用する値

このような衛星故障による異常信号を、図 5 に示す 5 つの相関点の値から検出する方法を、ここでは用いる。

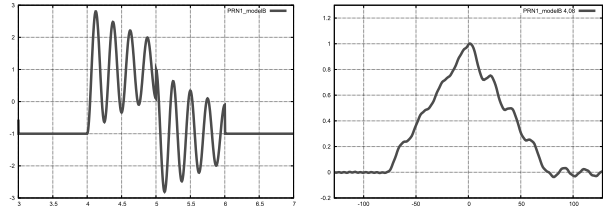


図 3: model B, $f_d = 4$, $\sigma = 0.8$

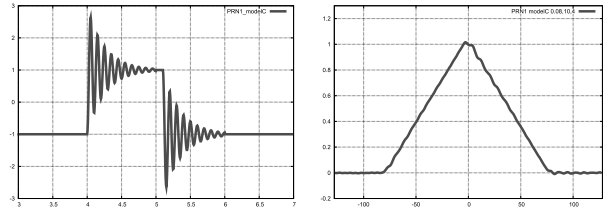


図 4: model C, $\Delta = 0.8$, $f_d = 10$, $\sigma = 4$

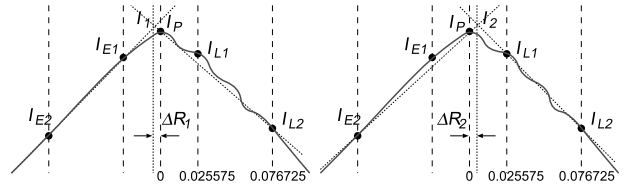


図 5: 検出に用いる相関値

まず、 I_{E1} と I_{E2} を通る直線と I_P と I_{L2} を通る直線の交点 I_1 と I_P との差から求めた測距差 ΔR_1 [m] と、 I_{L1} と I_{L2} を通る直線と I_P と I_{E2} を通る直線の交点 I_2 と I_P との差から求めた測距差 ΔR_2 [m] を求める。ここで、 ΔR_1 、 ΔR_2 は、信号強度 C/N_0 に依存するので、 C/N_0 の関数とし、 ΔR_1 、 ΔR_2 を、あらかじめ算出しておいた、それぞれの平均 μ_1 、 μ_2 と標準偏差 $\sigma_1(C/N_0)$ 、 $\sigma_2(C/N_0)$ により正規化する。

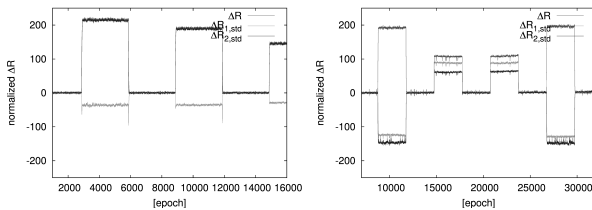
$$\Delta R_{1,\text{std}}(t, C/N_0) = \frac{\Delta R_1(t, C/N_0) - \mu_1}{\sigma_1(C/N_0)}$$

$$\Delta R_{2,\text{std}}(t, C/N_0) = \frac{\Delta R_2(t, C/N_0) - \mu_2}{\sigma_2(C/N_0)}$$

これらの 2 乗和の平方根

$$\Delta R(t) = \sqrt{\Delta R_{1,\text{std}}(t)^2 + \Delta R_{2,\text{std}}(t)^2}$$

を検出に用い、この値がしきい値を越えた場合に故障(異常信号)と判定する。図 6 に、ハードウェアシミュレーションにより求めた故障信号と正常信号を交互に入力したときの $\Delta R(t)$ 、 $\Delta R_{1,\text{std}}(t)$ 、 $\Delta R_{2,\text{std}}(t)$ の値を示す。このように、衛星故障による異常信号が発生した場合は、 $\Delta R(t)$ にバイアスとなって現れるため、しきい値を正常時の分布と故障時の分布の 2 つの分布の間に設定すると検出が可能となる。



(左) model A と正常信号を交互に入力した場合
 (右) model C と正常信号を交互に入力した場合
 図 6: ハードウェアシミュレーションの例

本手法では、追尾点での相関値を用いて左右対象でない相関点の組合せとすることにより、前回の提案手法 [2] で問題となっていた modelA 信号への不感を解消している。

4.2 しきい値決定方法

まず、統計量が正規分布する一般的な場合を考える。誤検出確率 (1.5×10^{-7}) に対応したしきい値を考えると、正常時の分布の中心 (0) から 5.26σ だけ離れたところの値 ($\pm 5.26\sigma$) となる。一方、未検出確率 (10^{-3}) に対応したしきい値を考えると、故障時の分布の中心 (E) から 3.09σ だけ小さい値 ($E - 3.09\sigma$) となる。この2つ値が一致するときの故障時の分布の中心は、この値をしきい値とした時に検出可能な最小誤差となるため、このときの故障時の分布の中心を最小検出可能誤差 (MDE; Minimum Detectable Error) という (図 7)。

正規化された $\Delta R_{1,std}(t)$ と $\Delta R_{2,std}(t)$ は標準正規分布に従うため、それらの自乗和である ΔR^2 は自由度 2 の χ^2 分布に従う。ここで、正規分布

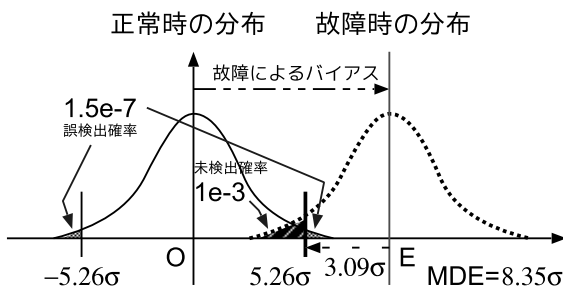


図 7: しきい値と最小検出可能誤差の考え方

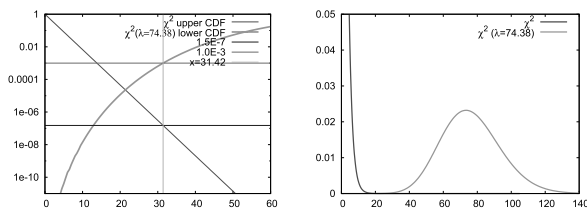


図 8: χ^2 分布と非心 χ^2 分布 ($\lambda = 74.38$)

の場合と同様に、 χ^2 分布の場合のしきい値および MDE を考える (図 8)。

自由度 2 の χ^2 分布の累積分布 (上側) を $Q(x)$ とする。 $Q(x)$ が誤検出確率 (1.5×10^{-7}) に対応するとき $x = 31.42$ となるので、 ΔR に対するしきい値として

$$\Delta R_{th} = \sqrt{31.42} \simeq 5.61$$

とすることができる。一方、故障時の分布は、 $\Delta R_{1,std}(t)$ と $\Delta R_{2,std}(t)$ の片方あるいは両方にバイアスが生じるため、自由度 2、非心度 λ の非心 χ^2 分布となる。この分布の累積分布 (下側) を $P(x)$ とする。 $P(x)$ が $x = 31.42$ で未検出確率 (10^{-3}) と一致するときの非心度を求めると、 $\lambda = 74.38$ となり、この平方根が ΔR の MDE に相当する。

$$\Delta R_{MDE} = \sqrt{74.38} \simeq 8.62$$

$\Delta R(t)$ に対するしきい値と MDE を $\Delta R_{1,std}$ と $\Delta R_{2,std}$ に分配すると、

$$\Delta R_{std_th} = \Delta R_{th} / \sqrt{2} \simeq 3.97$$

$$\Delta R_{std_MDE} = \Delta R_{MDE} / \sqrt{2} \simeq 6.10$$

とすることができ、それぞれの σ を乗じて、測距差に換算できる。

$$\Delta R_{n_th} = 3.97 \cdot \sigma_n(C/N_0) \quad n = 1, 2$$

$$\Delta R_{n_MDE} = 6.10 \cdot \sigma_n(C/N_0) \quad n = 1, 2$$

5. 解析例

本手法によるしきい値と MDE の評価のため、実信号を用いた解析を実施した。使用した GPS 受信機は、NovAtel 社製 Euro-3M で、この受信機は I 相、Q 相合わせて 10 点の相関値を取得可能である。ここでは、このうち図 5 に対応した I

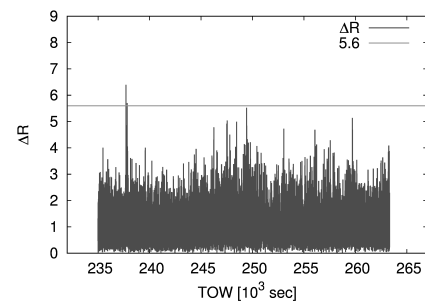


図 9: ΔR の計算例, PRN10, 2008.07.14

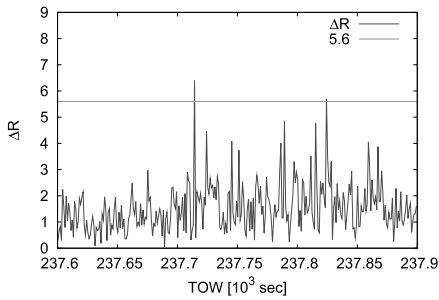


図 10: ΔR の計算例, PRN10, 2337700 秒付近

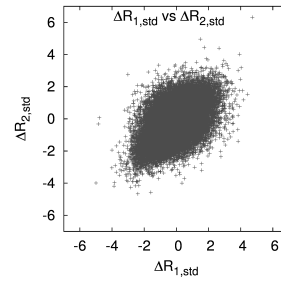


図 13: $\Delta R_{1,std}$ と $\Delta R_{2,std}$ の相関

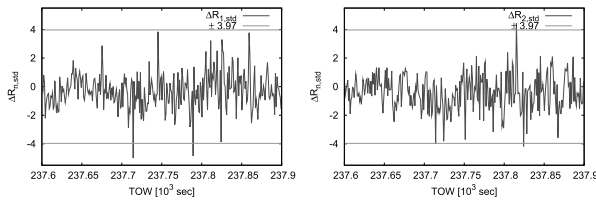


図 11: $\Delta R_{1,std}$, $\Delta R_{2,std}$ の計算例

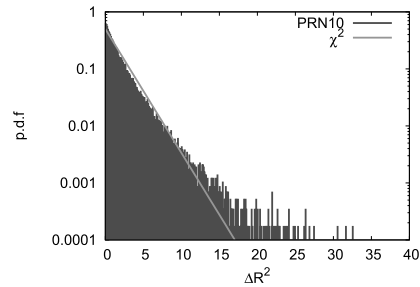


図 14: ΔR^2 の分布と χ^2 分布

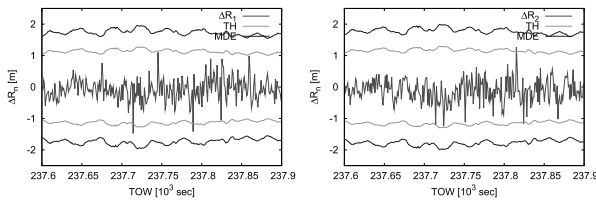


図 12: $\Delta R_1, \Delta R_2$ としきい値 ($\Delta R_{n,th}$) および MDE($\Delta R_{n,MDE}$)

相5点を用いた。例として2008年7月14日に取得したPRN10での結果を示す。

ΔR を図9に示す。237700秒付近でしきい値を越える(図10)が、故障は発生しておらず、これは誤検出であったと考えられる。図11に $\Delta R_{1,std}$, $\Delta R_{2,std}$ の例を、図12に $\Delta R_1, \Delta R_2$ とそれぞれのしきい値およびMDEを示す。MDEは最大で2m程度であった。

次に、 $\Delta R_{1,std}$ と $\Delta R_{2,std}$ の相関を図13に示す。このプロットより、 $\Delta R_{1,std}$, $\Delta R_{2,std}$ に若干の正の相関が見られることが分かる。図14に ΔR^2 の分布を図に示す。 ΔR^2 の分布は、裾のほうで χ^2 分布から乖離していることが分かる。相関があることで ΔR^2 の分布が χ^2 分布から乖離し、誤検出の原因となっていると考えられる。

6. まとめ

受信機で得られる相関値から衛星故障による異常信号を検出する手法と、しきい値の決定方法について述べ、実信号での解析例を示した。

未検出確率、誤検出確率から $\Delta R(t)$ のしきい

値およびMDEを決定し、測距差への換算を行ない、測距差に対するMDEを求めたところ、最大で2m程度であることが示された。これは、現在検討されている高カテゴリGBAS (FAST-D)のレンジングモニタに要求される許容誤差(未検出確率: 10^{-9})の1.65m[5]には達していないが、将来的には、警報時間を考慮したスムージング時定数を採用することで、ランダム雑音を抑制しMDEの低減が期待できる。

今後、警報時間を考慮したスムージング時定数の検討とともに、誤検出を減少させるために、 $\Delta R(t)$ の分布について分析し、 $\Delta R_{n,std}$ を正規化する関数の再検討を行い、評価のためのデータの収集と解析を行う予定である。

参考文献

- [1] C. Edgar et al.; "A Co-operative Anomaly Resolution on PRN-19", Proc. ION-GPS99, Sept. 1999.
- [2] 齊藤 他; "測距誤差推定によるGPS劣化信号検出について", 第7回電子航法研究所研究発表会講演概要, June, 2007.
- [3] 齊藤 他; "GBAS用SQMのしきい値の決定方法の検討", 信学総大B-2-32, Mar. 2009.
- [4] international Standards and Recommended Practices, Annex 10, Volume I, Attachment D, ICAO, Nov. 2001.
- [5] Draft GAST D SARPs, Appendix B, Sept. 2008.