

# 16. GPS 異常信号検出モニタ アルゴリズムの検討

※齊藤 真二，吉原 貴之，福島 荘之介，  
齋藤 享，工藤 正博，藤井 直樹



電子航法研究所 通信・航法・監視領域

第 9 回 電子航法研究所研究発表会  
平成 21 年 6 月 12 日

# Outline

## はじめに

研究の背景

故障信号モデルと相関波形

## 故障検出アルゴリズム

検出手法 (測距差推定)

ハードウェアシミュレーション

しきい値決定方法

## 実信号解析例

データ取得

解析結果

## まとめ



# 背景



## GPS を用いた航空機航法システム



GBAS (地上型衛星航法補強システム)

SBAS (衛星型衛星航法補強システム)



DGPS 技術の応用



## GPS 衛星故障



1993 年 ... SVN19 (SVN; space vehicle number)



RF 回路故障による信号異常



DGPS 利用者への影響



## 高い信頼性の要求



故障検出・ユーザーに対する警報



GPS 信号を監視する機能



SQM (Signal Quality Monitoring)

# GPS 信号の捕捉



受信信号と受信機  
で生成した C/A  
コード (レプリカ)  
との相関



C/A コード... 衛星毎に異なる PRN 符号



相関値のピークを追尾し測距



相関波形の形状は左右対称



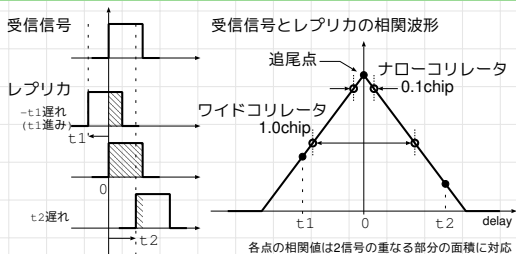
相関器ペアの出力が同レベルの中心を追尾



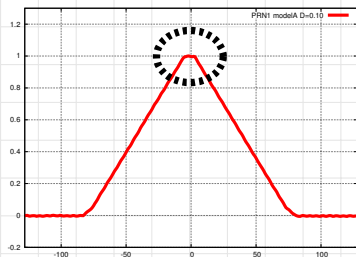
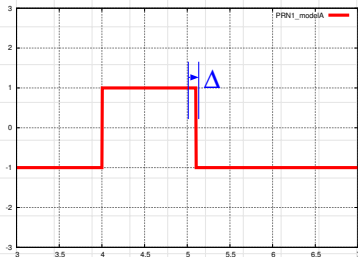
衛星故障による信号異常 → 相関波形の歪み




相関器の種類 (相関器幅) により異なる測距値




# 故障信号モデルと相関波形

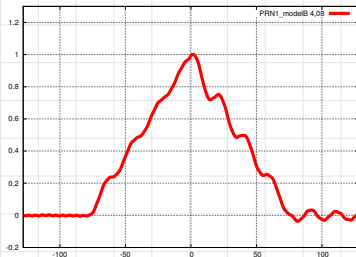
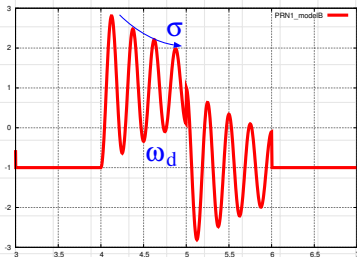


## modelA 故障信号の例

 左: 入力波形, 右: 相関波形

 信号の立下がりの遅延 ( $\Delta$ )

# 故障信号モデルと相関波形



modelB 故障信号の例



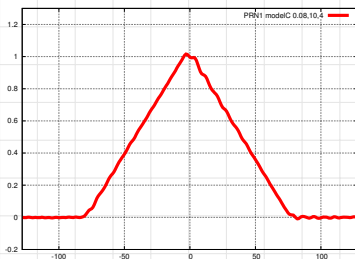
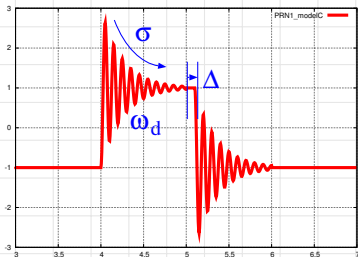
左: 入力波形, 右: 相関波形



振動 ( $\omega_d$ ), 減衰 ( $\sigma$ )

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

# 故障信号モデルと相関波形



## modelC 故障信号の例



左: 入力波形, 右: 相関波形

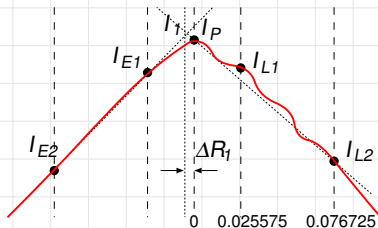


信号の立下がりの遅延 ( $\Delta$ ), 振動 ( $\omega_d$ ), 減衰 ( $\sigma$ )

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



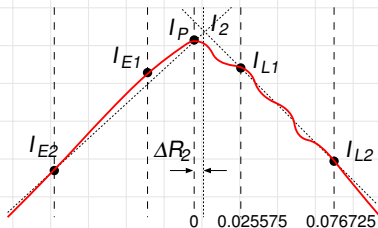
# 検出に用いる相関点



$I_{E1}$  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:  $\Delta R_1$



# 検出に用いる相関点





$I_{E1}$  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:  $\Delta R_1$




$I_{L1}$  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:  $\Delta R_2$

# 故障検出に用いる値

  $\Delta R_1, \Delta R_2$  の値は, 信号強度  $C/N_0$  の関数

  $\Delta R_n$  を平均  $\mu_n$  と標準偏差  $\sigma_n$  により正規化

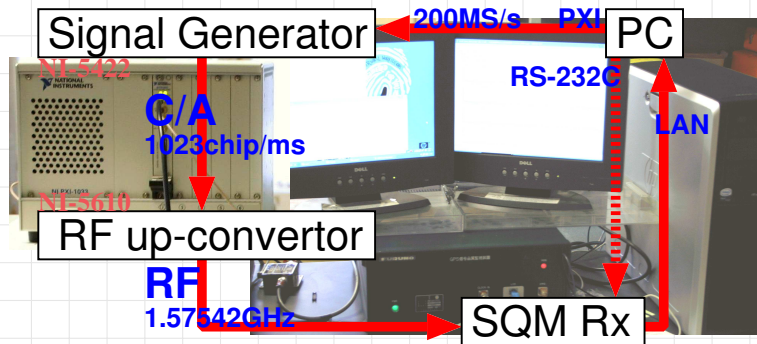
$$\text{🦉} \Delta R_{n,std}(t, C/N_0) = \frac{\Delta R_n(t, C/N_0) - \mu_n}{\sigma_n(C/N_0)}$$

 2乗和の平方根

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

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

# ハードウェアシミュレーション



PCで擬似信号(1023chip分)を作成

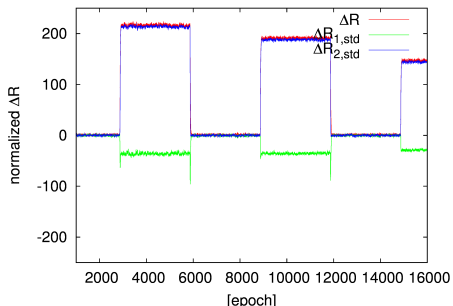
→ SGで1023chip/msの信号 → IF信号を発生

→ RFアップコンバータでL1に



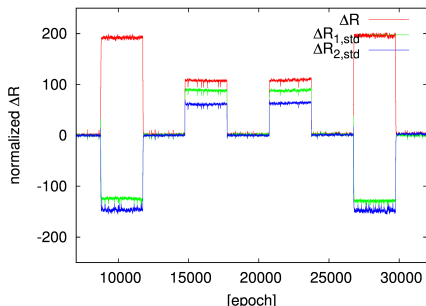
SQM受信機の出力をPCで収集

# 擬似故障信号を入力したときの $\Delta R(t)$



modelA 故障信号と正常信号を交互に入力

# 擬似故障信号を入力したときの $\Delta R(t)$



modelA 故障信号と正常信号を交互に入力

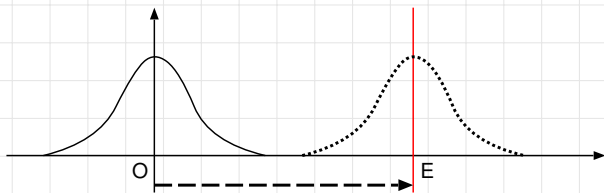


modelC 故障信号と正常信号を交互に入力



$\Delta R(t)$ : 故障信号時にバイアスが発生

# 正規分布の場合の考え方



正常時と故障時の分布  
(故障によりバイアスが発生)

# 正規分布の場合の考え方

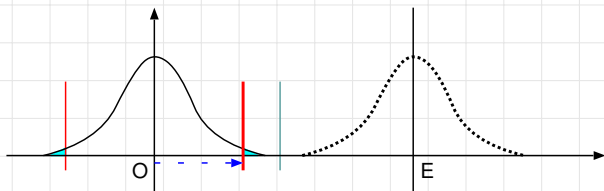


正常時と故障時の分布  
(故障によりバイアスが発生)



しきい値は2つの分布の間

# 正規分布の場合の考え方



正常時と故障時の分布  
(故障によりバイアスが発生)



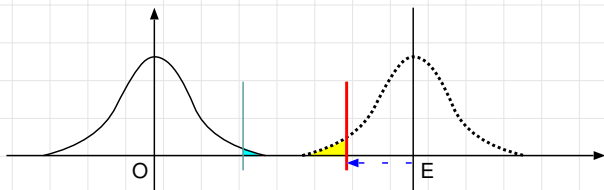
誤検出確率  $1.5 \times 10^{-7}$  に対応したしきい値



$5.26\sigma$



# 正規分布の場合の考え方



正常時と故障時の分布  
(故障によりバイアスが発生)



誤検出確率  $1.5 \times 10^{-7}$  に対応したしきい値



$5.26\sigma$

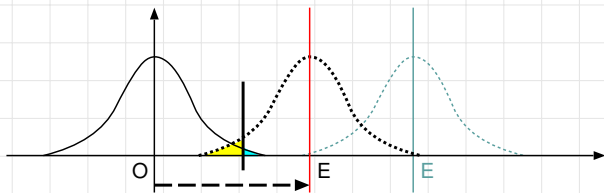


未検出確率  $10^{-3}$  に対応したしきい値



$E - 3.09\sigma$

# 正規分布の場合の考え方



正常時と故障時の分布  
(故障によりバイアスが発生)



誤検出確率  $1.5 \times 10^{-7}$  に対応したしきい値



$5.26\sigma$



未検出確率  $10^{-3}$  に対応したしきい値

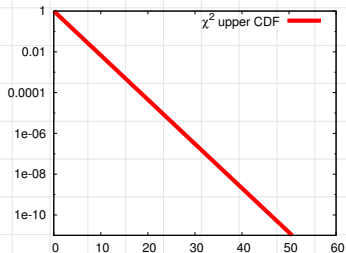


$E - 3.09\sigma$



最小検出可能誤差 (MDE)  $\dots 8.35\sigma$

# しきい値の決定方法

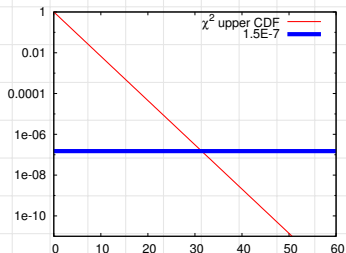


$\Delta R_{n,std}(t)$  は標準正規分布



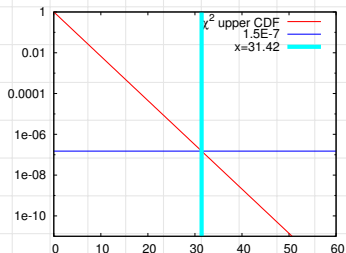
$\Delta R^2$  は自由度 2 の  $\chi^2$  分布

# しきい値の決定方法



累積分布 (上側) $Q(x)$  が  $1.5 \times 10^{-7}$

# しきい値の決定方法

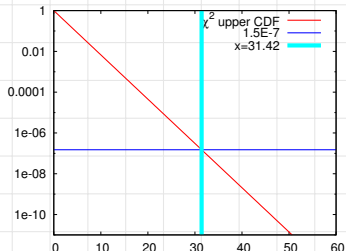



累積分布 (上側)  $Q(x)$  が  $1.5 \times 10^{-7}$




$x = 31.42, \Delta R \simeq 5.61$


# しきい値の決定方法



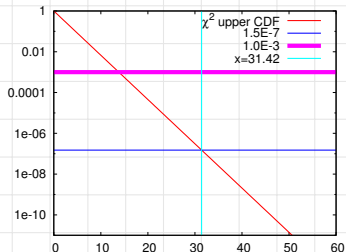
 累積分布 (上側)  $Q(x)$  が  $1.5 \times 10^{-7}$


  $x = 31.42$ ,  $\Delta R \simeq 5.61 \rightarrow$  しきい値


 故障時の分布


 自由度 2 の非心  $\chi^2$  分布 (非心度  $\lambda$ )

# しきい値の決定方法

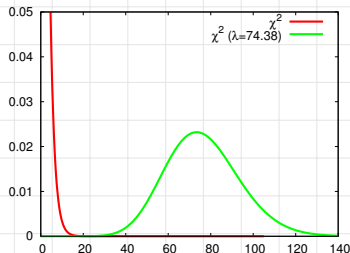
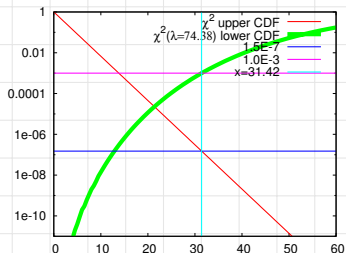



 累積分布 (上側)  $Q(x)$  が  $1.5 \times 10^{-7}$


  $x = 31.42$ ,  $\Delta R \simeq 5.61 \rightarrow$  しきい値


 累積分布 (下側)  $P(x)$  が  $x = 31.42$  で  $10^{-3}$

# しきい値の決定方法



 累積分布 (上側)  $Q(x)$  が  $1.5 \times 10^{-7}$


  $x = 31.42$ ,  $\Delta R \simeq 5.61 \rightarrow$  しきい値

 累積分布 (下側)  $P(x)$  が  $x = 31.42$  で  $10^{-3}$


 非心度  $\lambda = 74.38$ ,  $\Delta R \simeq 8.62 \rightarrow$  MDE に相当



# しきい値, MDE と測距差の関係


 検出に用いる値  $\Delta R(t)$

$$\img alt="lightbulb icon" data-bbox="184 348 214 393"/> \Delta R(t) = \sqrt{\Delta R_{1,std}(t)^2 + \Delta R_{2,std}(t)^2}$$

  $\Delta R_{1,std}$  と  $\Delta R_{2,std}$  に分配


$$\img alt="lightbulb icon" data-bbox="184 504 214 549"/> \Delta R_{n,std} \text{ に対するしきい値: } 5.61/\sqrt{2} \simeq 3.97$$

$$\img alt="lightbulb icon" data-bbox="184 564 214 609"/> \Delta R_{n,std} \text{ に対する MDE: } 8.62/\sqrt{2} \simeq 6.10$$

 測距差に換算

$$\img alt="lightbulb icon" data-bbox="184 694 214 739"/> \Delta R_n \text{ に対するしきい値: } 3.97 \cdot \sigma_n(C/N_0)$$

$$\img alt="lightbulb icon" data-bbox="184 749 214 794"/> \Delta R_n \text{ に対する MDE: } 6.10 \cdot \sigma_n(C/N_0)$$

 正常時にしきい値を越えること (誤検出) があるか!?

 MDE が擬似距離誤差の許容値を満足しているか!?

# 実信号解析



## 目的



誤検出の有無



MDE と擬似距離誤差の許容値の比較



## 使用データ



受信機: NovAtel 社製 Euro-3M

- I相, Q相合わせて10点の相関値を取得可能

- うちI相5点を使用

- データ取得間隔: 1.0秒



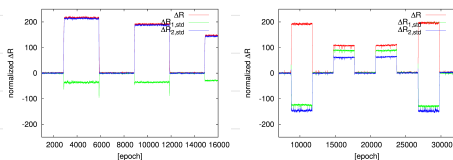
取得場所: 調布市 電子航法研究所

- 右写真: アンテナ鉄塔



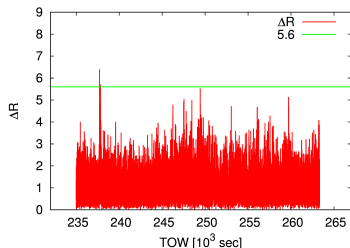
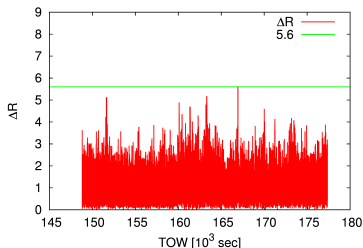
# スムージング処理

- ✈️  $\Delta R$  は故障時にはバイアス的な変化を示す
- 🦉 前述のハードウェアシミュレーションの結果



- ✈️ 誤検出の低減
- 🦉 正規化前の  $\Delta R_1$ ,  $\Delta R_2$  をスムージング  
(ローパスフィルタ)
- 🦉 ランダム性の雑音の影響の排除
- ✈️ TTA (Time to Alert) を考慮した時定数
- 🦉 3秒 (6秒のうちの地上装置への割り当て)

# $\Delta R$ の算出例



2008年7月14日, PRN10



スムージング処理無し



パルス性のノイズ

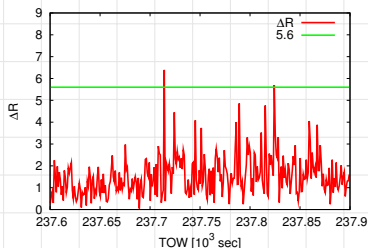
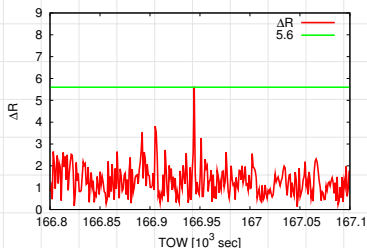


TOW=166950付近と237700付近



$\Delta R >$  しきい値 ... 誤検出

# $\Delta R$ の算出例



2008年7月14日, PRN10



スムージング処理無し



パルス性のノイズ

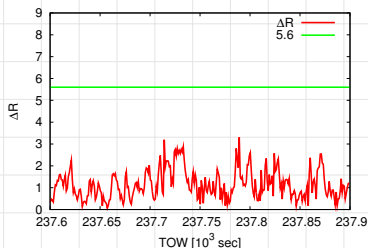
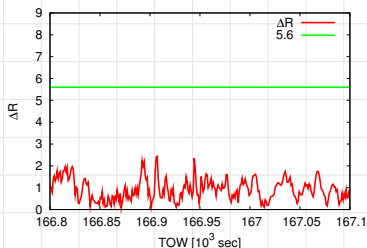


TOW=166950付近と 237700付近



$\Delta R >$  しきい値 ... 誤検出

# $\Delta R$ の算出例



2008年7月14日, PRN10



TTA (Time to Alert) を考慮してスムージング



時定数 : 3 秒

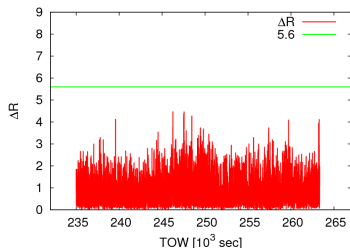
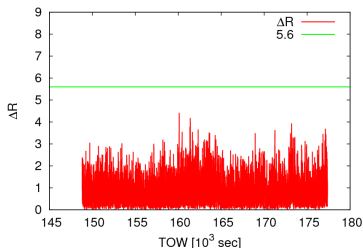


TOW=166950 付近と 237700 付近



$\Delta R >$  しきい値 ... ではなくなった

# $\Delta R$ の算出例



2008年7月14日, PRN10



TTA (Time to Alert) を考慮してスムージング



時定数 : 3 秒

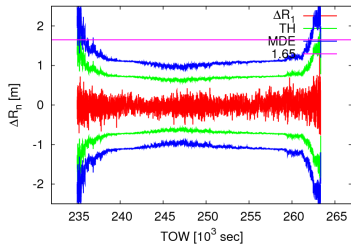
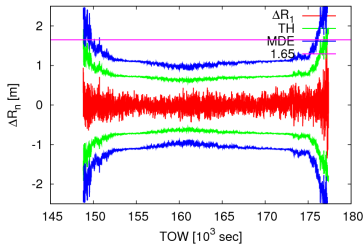


TOW=166950 付近と 237700 付近



$\Delta R >$  しきい値 ... ではなくなった

# $\Delta R_n$ としきい値, MDE(測距差換算)



## $\Delta R_1$ に対する MDE



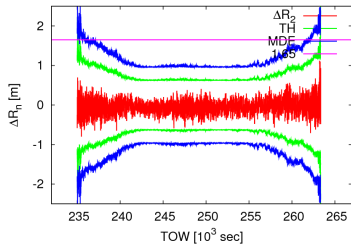
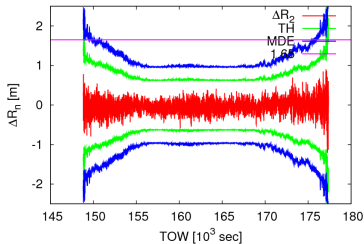
衛星の出没時を除き 2m 以下



高  $C/N_0$  の場合は ほぼ 1m



# $\Delta R_n$ としきい値, MDE (測距差換算)



## $\Delta R_2$ に対する MDE

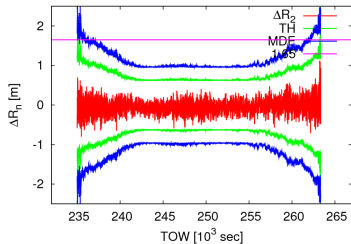
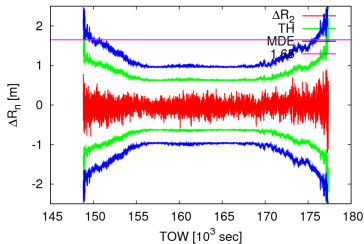


衛星の出没時を除き 2m 以下



高  $C/N_0$  の場合は ほぼ 1m

# $\Delta R_n$ としきい値, MDE(測距差換算)



## $\Delta R_n$ に対する MDE



衛星の出没時を除き 2m 以下



高  $C/N_0$  の場合は ほぼ 1m




FAST-D (Facility Approach Service Type D) の draft





擬似距離誤差: 1.65m (未検出確率:  $10^{-9}$  / 事前確率)




# まとめ


 SQM → 衛星の故障を検出するモニタ


 故障信号モデル (SARPs で定義)


 複数相関値から検出する手法


 しきい値の決定方法

 要求される継続性, 完全性

  $\Delta R$  のしきい値, 最小検出可能誤差 (MDE)

 測距差との対応

 実信号の解析

 測距差に対する MDE

→ 1m~2m の範囲  $\leq$  FAST-D (1.65m)

# 今後の課題



## スムージング時定数の検討



GBAS 補正值生成のキャリアスムージング  
時定数: 100 秒



## $\Delta R_{n,std}$ の正規化方法について再評価



$\Delta R_{n,std}$  が標準正規分布に従うことが前提



$C/N_0$  の 4 次関数



仰角の関数, 次数



## 評価のためのデータの収集と解析



## 評価用システムへの本モニタの導入

# おわり



ご静聴 どうも  
ありがとう  
ございました