

1. 監視システムの技術性能要件の研究

監視通信領域 ※小瀬木 滋、古賀 禎、大津山 卓哉、本田 純一、住谷 泰人

1. はじめに

現在の航空管制及び将来の運用方式をシームレスに実現することで、ボトルネックを持たない円滑な航空路運用が可能になると期待される。しかし、山間部谷間の空港のレーダ運用など一部の空域では航空監視システム（以下、監視システムという）の性能が劣化する例がある。また、厳しい運用環境下ではレーダの維持管理が困難となる経済的課題もある。このように、単一の監視方式のみでは、シームレスな運用を実現できない場合がある。その解決のためには、目的の運用方式を実現できる性能を持つ監視システムを運用環境に応じて選択するなど、性能準拠（Performance Based）の考え方で監視システムの導入判断が求められる。

本稿では、管制官やパイロットが用いる監視システムについて、運用要件から導出された技術性能要件（監視性能の許容範囲）の例を紹介する。さらに、このような性能要件を活用するために必要な、性能の評価確認手法を報告する。特に、監視システムの技術性能要件に見られる小さな確率値を直接測定するために必要な測定試行回数の算出方法、測定試行回数を削減できる効率的な評価手法、適切な評価のために必要な測定用信号源の条件を示す。

2. 監視システムの技術性能要件の例

監視システムは、管制官やパイロットに監視情報を提供する。情報提供システム一般について、ISO13236に標準化された性能要件の考え方によれば、システムが提供するデータ項目毎に適用する性能の属性を必要数適用している。EUROCONTROLはこの考え方をを用いて、航空管制用監視システムの性能要件をまとめた[1]。根拠には、航空管制など運用要件が用いられている。データ項目と属性の対応を表1に示す。

監視性能の属性は、有用性 (Av: Availability)、連続性 (Cont: Continuity)、時間 (Ti)、一貫性 (Coh: Coherence)、完全性 (Integrity) が用いられ

る。完全性を定める誤差限界は、主な誤差 (Core: Core error)、相関誤差 (Corr: Correlated error)、突発誤差 (Sp: Spurious error)に分類する。

航空管制用監視システムの場合、管制に使用するデータ項目毎に監視性能の属性を考える。データ項目としては、水平位置、気圧高度、SPI/非常時等識別情報、機体識別情報、昇降率、トラック速度、システム管理情報などがある。

例えば、5NM 間隔の航空管制を運用方式とすると、水平面内位置の完全性 (位置-Corr) は、実際のターゲットの 7NM 以内に発生する誤ターゲット (相関処理済み) が 1 時間あたり 2 回以下である[1]。これは、航空機の位置誤差を 0.5NM 許容すると、約 0.00000004 に相当する。

表1. データ項目と適用属性[1]

項目	Av	Cont	Core	Corr	Sp	Ti	Coh
位置	○	○	○	○	○	1	○
高度	○	○	2	○	○	○	3
SPI	4				○	○	×
識別	○	×	○	×	○	○	×
昇降	5	6	7		○	1	×
速度	5	6	7		○	1	×
管理	8	○	×	×	×	×	×

○：適用（値は[1]参照）、×：適用除外項目、1：誤差とともに考察、2：突発誤差も配慮、3：一部は時間要因とともに考察、4：運用手順を配慮、5：使用地域の条件で設定、6：トラックを配慮、7：通常の管制では不要だが衝突検出などでは配慮、8：使用地域の条件で設定

3. 監視性能の測定における確率値の検定

監視性能の中には、提供する監視情報の完全性などのように確率で表されるものがある。本稿では、ある性能値 p を持つ監視システムを繰り返し測定して p を推定し、仕様に定められた性能要件値 p_0 と比較する良否判定を想定する。

3.1. 検定に必要な試行回数

信号の検出の有無、誤検出の有無、出力情報の正誤判定の成功/失敗など、監視情報には二

値をとるものがある。ここで、仕様に失敗率 p_0 が定められており、 n 回の測定結果に信号検出漏れや判定誤りなど k 回の失敗（測定された失敗率= k/n ）が観測されたとする。測定期間中に監視性能 p が一定であり、各測定は独立した確率過程と見なせるとき、 n 回の測定結果に見られる失敗数 k （測定値 k/n ）は二項分布 $Bi(n,p)$ に従い分布する[2]。ただし、 $0 \leq k \leq n$ である。

ここで、仕様値 p_0 を基に棄却点 p_a を定め、次の仮説検定を考える。

- 帰無仮説： $p \leq p_a$ 仕様を満たす
- 対立仮説： $p > p_a$ 仕様を満たさない

図1のように、機器性能が $p \leq p_0$ であっても帰無仮説を棄却し、良品を不良品と判定する場合があります。逆に、 $p > p_0$ であっても帰無仮説を採択し、不良品を良品と判定する場合もある。

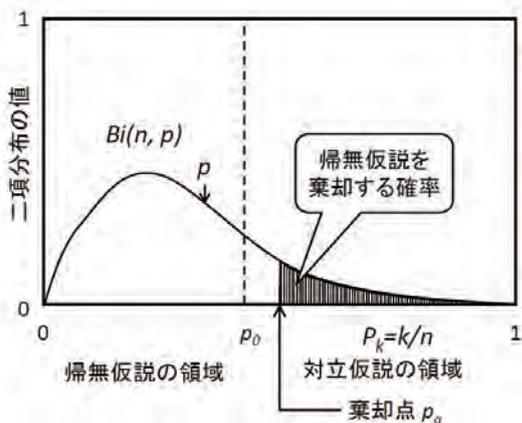


図1. 測定値の分布と仮説を棄却する確率

棄却点 p_a より測定値 k/n が大きな値になる確率を二項分布 $Bi(n,p)$ から求めることができるが、測定回数 n 、機器の性能 p 、棄却点 p_a の関数になることがわかる[3]。

余裕率 $c = p_a / p_0$ を想定して p_a を定め、良否判定を誤る確率の制限（有意水準）を満たす測定回数 n を求めた結果を表2に示す[4]。ただし、 a は良品を不良品判定する有意水準、 a' は不良品を良品判定する有意水準とする。また、測定値 k/n に応じて次の判定をする。

- $k/n \leq p_a$ 良品
- $p_0 \leq k/n$ 不良品

ただし、 $p_0 < k/n < p_a$ は両方を満たすため、判定保留とすることで判定誤りを避けるとする。

表2に示すように、許容する誤り率や仕様値

p_0 に応じて必要な測定回数 n が変化し、特に p_0 が小さな値になると測定回数 n が増加する。

毎秒 100 回の測定が可能な測定システムを想定すると、 $p_0 = 0.000001$ の仕様値を検定する場合、通常の検定では約 7.7 時間、比較的厳しい検定では約 64 日かかることがわかる。

表2. 良否判定に必要な測定回数 n

p_0	通常の検定 $C=2$ 、 $a=0.05, a'=0.2$	比較的厳しい検定 $C=1.1$ 、 $a=0.01, a'=0.1$
0.05	55	5228
0.01	275	54955
0.001	2755	545910
0.000001	2.756E6	5.550E8

3.2. 監視情報の完全性の算出

本項2.に示すように、監視情報の完全性など、性能要件が非常に小さな確率で定められる場合がある。しかし、小さな確率を直接測定する場合は測定回数が増加し、実用的ではない。このため、ここでは別の評価手法を提案する。

監視システムは、航空機の位置を測定する監視センサと、その出力である位置測定値など監視情報を処理して情報の品質を向上させる監視情報処理から構成される。

監視センサには、ASR (Airport Surveillance Radar) 等の一次レーダ、航空管制用二次監視レーダ SSR (Secondary Surveillance Radar)、マルチラレーションなど測定機能を持つもの他、ADS-B (Automatic Dependent Surveillance - Broadcast) や ADS-C (同 - Contract) のように航空機搭載航法装置から位置等測定値をデータリンクにより得るものもある。これらが出力する監視情報には、測定誤差、欠落（更新漏れ：存在する航空機の検出漏れ）、誤検出（存在しない航空機の監視情報出力）等が見られる。

監視情報処理では、これらの監視情報に相関処理や追尾処理を行うことで測定誤差の軽減、監視データ出力の連続性や完全性を向上させている。監視情報処理は、採用している処理方式に応じて、入力情報と出力情報の統計的性質の間に一定の関係がある。

入力される情報の尤度比（=検出率/誤検出率）が既知の場合、ベイズの定理を用いて監視

情報処理による情報誤りの軽減状況を算出できる[5]。また、図2の例のように、トラックファイル生成のための相関処理は、状態遷移モデルを用いて記載できる。これらを組み合わせて、尤度比から出力情報の完全性を計算できる[6][7]。このように完全性の仕様値を尤度比の条件に換算できるため、比較的容易に測定できる検出率と誤検出率を用いて完全性を評価できる。有用性や連続性も検出率から換算できる。

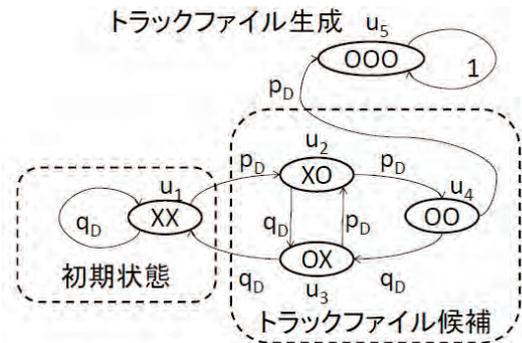


図2. トラックファイル生成処理モデルの例
ただし、検出率 p_D , $q_D=1-p_D$ とする

4. 監視性能測定用ベンチテストの条件

監視情報の有用性、連続性、完全性の測定を効率的に行うには、監視センサの性能である検出率と誤検出率の測定が必要となる。監視センサの性能測定には、試験信号を送受信しながら測定を進めるベンチテストが用いられるが、検出率と誤検出率は試験信号に重畳する干渉信号の影響を受けて変化する。本稿では、干渉信号も用いる干渉ベンチテストについて説明し、その測定結果が実環境で得られるものを表せるようにする手法を紹介する。

4.1. 干渉ベンチテストの概要

インタロゲータの性能測定の例について、干渉ベンチテストの方法を図3に示す。

二次監視レーダや航空機衝突防止装置を持つインタロゲータ（質問装置）は、送信した質問信号に対する応答信号を受信解読することで監視情報を得ている[8]。試験信号源としてトランスポンダ（応答装置）シミュレータを接続し、質問信号に対する応答信号を発生する。使用する信号の波形や周波数を測定機器で確認しながら被試験インタロゲータの信号検出状況を記録し、応答信号検出率や誤検出率を測定する。

応答信号の検出率や誤検出率は、試験信号に重畳する干渉信号の数やその電力などの影響を受けるため、これらを実際の運用環境に近いものにするにより測定精度が向上する。

干渉信号には、被測定信号に同期して発生するマルチパス波の干渉や、同一質問信号に同期して発生する応答信号による同期性ガブルが知られている。これらの発生手法は、遅延回路を用いる手法や、複数のトランスポンダシミュレータを用いる手法などが確立されている。

一方、被測定応答信号に同期することなくランダムなタイミングで干渉する非同期干渉妨害も知られている。雑音で信号発生器をトリガして干渉信号を発生させる試験装置も過去に製作したが、その影響が実際の運用環境の状況を表せるものであるか検証されていない。本稿では、その試験用干渉信号源の改良を提案する。

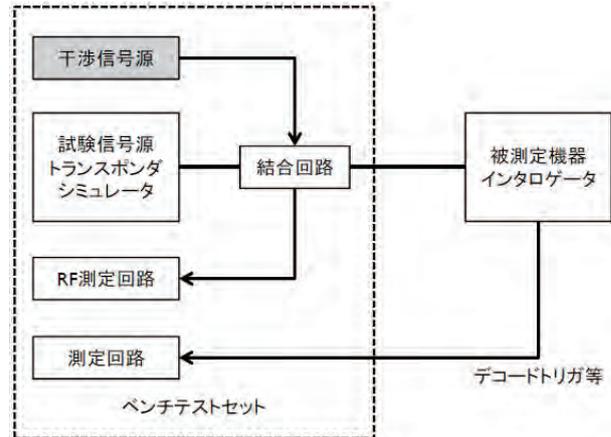


図3. 干渉ベンチテストセットの構成

4.2. 適切な非同期干渉信号の発生方法

本稿で考える SSR 等の監視システムは、1090 MHz 帯域の信号を受信する。監視システムのために送信された応答信号など 1090MHz 帯域内の信号は、発生時間率（デューティ比）は低い、相互に同期した送受信動作をしないため、相互に非同期干渉妨害を与える。

当研究所では、非同期干渉妨害の測定結果について統計的性質を研究してきている[9]。その結果、応答信号等にある受信電力以上で重畳する干渉信号の数（混信数）はポアソン分布で正確に近似できることがわかっている。また、非同期干渉する信号の電力分布は、電力に反比例する成分と電力の平方根に反比例する成分で近

似できることも知られており、測定により電力に反比例する事例が確認されている。

全ての干渉信号をトランスポンダシミュレータで発生させることもできるが、実際に空域内で運用されている航空機数と同様の数が必要となり、経済的ではない。また、干渉信号を受信記録して再生しながら測定する方法もあるが、測定条件を自由に設定できない。そこで、比較的少数の信号源を用いて非同期干渉妨害の統計的性質を再現する手法を提案する。

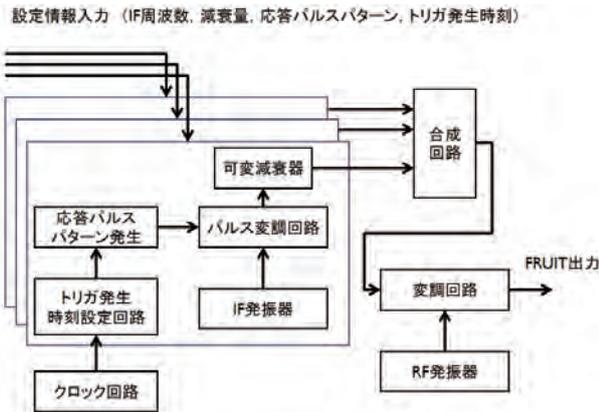


図 4. 非同期干渉妨害のための干渉信号源

図 4 のように、送信信号のパルスパターン、電力、タイミング、信号周波数などを高速設定できる信号源を必要数組み合わせ、非同期混信妨害を模擬する方法を考える[10]。このとき、信号発生の時間間隔を指数分布させると、混信数をポアソン分布させることができる[2]。

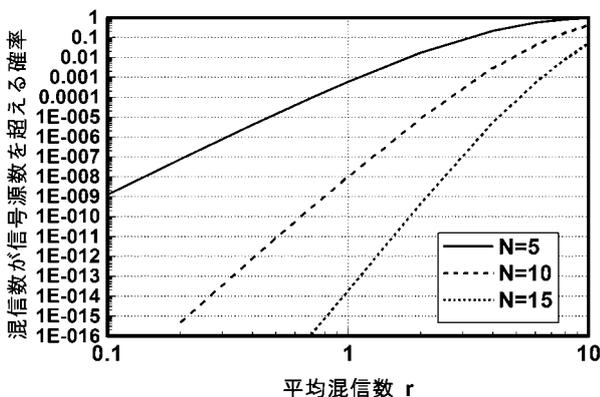


図 5. 混信数が信号源数を超える確率

混信数がポアソン分布することを想定し、信

号源の数を N とし、測定中に混信数が N を超える確率を算出できる。結果を図 6 に示す[10]。

さらに、図 5 の確率値から、測定回数 n の全試行について混信数が N を超えることなく忠実に非同期混信妨害を再現できる確率を求めることができる。例えば、平均混信数が 1 の場合、 $5.5E8$ 回の測定でも信号源を 12 個使うと信号源が不足しない確率は 0.966 となる[10]。このようにして、測定の信頼性の要件を満たすよう信号源の数を選択できる。

5. まとめ

監視システムの選定に性能準拠の考え方を導入するため、監視システムの技術性能要件や、その活用に必要な性能評価手法をまとめた。特に、小さな確率値で表される性能の検証に必要な測定回数の求め方、その削減手法、干渉ベンチテストセットの設計手法を示した。

参考文献

- [1] EUROCONTROL-spec-0147, March, 2012
- [2] 国沢：”確率論とその応用”、岩沼書店、1982年
- [3] 東京大学教養学部統計学教室：”自然科学の統計学”、東京大学出版会、1992年
- [4] 小瀬木他：”空域監視情報のインテグリティ測定のための試行回数”、信学技報 SANE2013-127、pp85-90、2014年1月
- [5] S. S. Blackman: “Multi-Target Tracking with Radar Application”, Artech-House, 1986
- [6] 小瀬木他：”監視性能が時間変化する場合の監視情報の信頼性”、信学総大、2012年3月
- [7] 小瀬木他：”トラック処理を考慮した監視情報インテグリティ算出法”、信学技報 SANE2013-107、pp1-6、2013年12月
- [8] M. C. Stevens: "Secondary Surveillance Radar", p177, Artec House, 1988
- [9] 小瀬木他：”モード S 拡張スキッタへの非同期混信妨害の統計モデル”、電子航法研究所報告第 102 号、2003 年
- [10] 小瀬木他：”1090MHz 非同期干渉試験のための信号源設計手法”、信学技報 SANE2014-2、pp7-12、2014 年 4 月