

3. GNSS 代替のための DME 地上局のインテグリティ保証

航法システム領域 ※毛塚 敦, 齊藤 真二

1 まえがき

RNAV（広域航法）では主に GNSS（全球測位衛星システム）が使用されており、RNP 経路などをはじめ、GNSS の装備が必須となる経路が増加している。さらに今後は、全飛行フェーズにおける RNP 化が進められ、標準計器出発方式（SID；Standard Instrument Departure）および標準到着経路（STAR；Standard Terminal Arrival Route）への RNP1 およびエンルートへの RNP2 の導入計画が進められている[1]。

しかし、GNSS 信号は高度約 20,000m の衛星から到来するため、航空機に到達する際の電力は微弱であり、干渉、ジャミング、衛星の不具合など様々な要因によって GNSS が利用できない状況が発生している[2][3]。そこで、GNSS が使用できなくなった場合でも運航を維持できるように、GNSS のバックアップ航法として APNT（Alternate Positioning, Navigation and Timing）の構築が検討されている。

APNT は近年、短期、中期的と長期的な処置に分けて検討が進められている。特に欧州では、短期・中期 APNT では既存の DME（Distance Measuring Equipment）を活用して PBN をサポートすることが検討され[4]、長期的には L-DACS NAV や e-Loran などの新たな測位技術の導入が視野に入れられている。欧州の中期的 APNT としては、複数の DME を用いた測位（Multi-DME）等の導入が検討されているが、短期的な APNT では、既存の DME の地上局側のインテグリティを保証し、GNSS の装備が必要となる RNP1,2 経路を DME による測位で飛行できるようにすることが検討されている[5]。2018 年に欧州標準化団体である EUROCAE にて Work Group-107 が発足し、DME 地上局のインテグリティを保証に関する標準化が開始された。現在、標準化ドキュメントである MOPS ED-57 の改訂と MASPS 作成が進行中である。

本研究では、国内において DME による測位を RNP1 および RNP2 経路に適用するにあたり、

課題の一つとなる地上局のインテグリティ保証について検討した。

2 DME 地上局のインテグリティ保証

DME では航空機に搭載されたインテロゲータ（質問器）からパルスを送信し、パルスを受信した地上の DME トランスポンダ（応答器）が一定時間後にパルスを送信する。航空機上では、質問パルス発出から応答パルス受信までの時間差を用い、DME 地上局との距離を測ることができる。そして、2 局の地上 DME を使用することにより測位が可能となり、RNAV 経路にて利用されている。

ICAO PBN マニュアルによると、RNP1 および RNP2 経路では 2NM, 4NM の経路逸脱の確立が 10^{-5} /h を超える場合にはアラートを発出する必要がある旨記述されている。このため、航法装置についても故障や異常により使用すべきでない場合にパイロットにその旨を通知し、航法装置を使用できない状態にする必要があり、その能力（確率）はインテグリティと定義される。すなわち、RNP 経路を飛行する場合には、機上にて性能を監視し、警報を出す OPMA（Onboard Performance Monitor and Alert）が必要であり、OPMA を有する GNSS 機上装置は RNP 経路の飛行が可能となる。

一方で機上の DME には測位の異常を検出する機能が備わっていない。しかし、そもそも PBN マニュアルは衛星航法を対象として考えられており、衛星は異常時に送信をシャットダウンする機能は備えていないために OPMA を必要としている。一方で DME 地上局は衛星と違い、異常を検出し、送信を停止するモニタ機能（GPMA: Ground Performance Monitor and Alert）を備えている。この GPMA が OPMA を補完できるものと考えられる[4]。これにより、DME 地上局のインテグリティを保証することで DME による RNP 経路飛行を可能とすることができる解釈される。

なお、インテグリティは SIS（Signal-in-Space）で定義されるため、地上装置の故障に加え、マルチパスがインテグリティ脅威の一つとなり得る。

3 我が国における課題

我が国を含め、各国で運用中の地上 DME 装置は、図 1 に示すようなデュアルモニタで構成されている。モニタのロジックには OR 形式と AND 形式があり、OR ロジックでは、モニタのどちらかが異常を検出した場合にシャットダウンを行い、AND ロジックでは、2つのモニタが同時に検出した際にシャットダウンを行う。2つのロジックの特徴としては、OR モニタはどちらか一方が検出すると直ちにシャットダウンするため、サービスの継続性（コンティニュイティ）の点で不利である。しかし、異常の検出においては有利であり、高いインテグリティ性能となる。一方で、AND モニタは、1つのモニタが異常を検出してもシャットダウンせず、2つが同時に検出してからシャットダウンするため、サービスの継続性の点で有利となるが、インテグリティの点で不利となる。

諸外国の DME 地上装置は AND と OR のロジックの切替えが可能となっているため、必要に応じて OR ロジックに切り替えることが可能であり、高いインテグリティ要求を満たす点において有利である。一方で、我が国で現在運用中のすべての DME 地上装置は、高いサービスの継続性を提供するために AND ロジックで構成されており、OR ロジックへの切り替えには改修を伴う。このため、高いインテグリティ性能を満たす点で不利である。しかし、AND ロジックのままインテグリティ要求を満足できれば、高いサービス継続性を維持できることにな

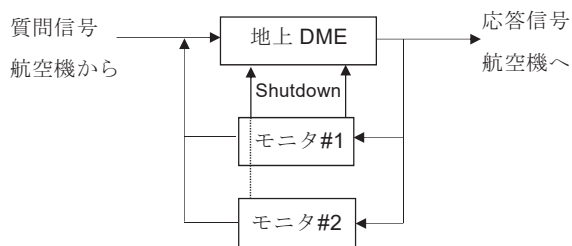


図 1 DME 地上局のモニタ

る。よって、AND ロジックにより要求インテグリティを満たすことが我が国にとって最も有益であり、その実現が課題である。

4 モニタロジックの違いによるインテグリティリスクの差

4.1 解析モデル

一般的なデュアルモニタ構成を例に OR ロジックと AND ロジックでどの程度のインテグリティに差が生じるかを定量的に明らかにした。地上のトランスポンダ装置が故障しているにも関わらず運用状態となっている確率の推定値をインテグリティリスクとし、その計算には WG-107 にて Luca Saini 氏らが提案する方法[6]を用いた。この方法では、運用開始から END to END テスト（メンテナンス）までの期間において任意の時間間隔 $t \sim t+h$ でのインテグリティリスクを算出し、時刻 t において既に存在するインテグリティリスクと足し合わせることで運用期間中のインテグリティリスクを算出する。

通常、モニタ（MON）にはモニタチェック機能（MIT; Monitor Integrity Test）が付加されている。モニタが故障した後でトランスポンダが故障した場合にはインテグリティリスクへ寄与するが、モニタチェックを備えている場合、モニタの故障をモニタチェックが検出できることになる。よって、モニタが故障した段階で適切にシャットダウンすることができれば、インテグリティリスクへ寄与しないことになる。本稿では、トランスポンダ、モニタ 2つ、モニタチェック 2つの 5 コンポーネントの構成で検討した。

4.2 時刻 t において存在するインテグリティリスク計算方法

複数のコンポーネントで構成される機器が故障する場合、故障のシーケンス（順番）が存在し、故障のない場合（余事象）との確率の和は 1 となる。故障のシーケンスによって、インテグリティリスクに寄与するものとそうでないものに分けられる。例えばモニタやモニタチェックが壊れても、トランスポンダがそもそも壊れない場合にはインテグリティリスクへの寄与は

ない。モニタチェックが故障した後でモニタが故障し、トランスポンダが故障した場合にはシャットダウンされない状態になるため、インテグリティリスクへ寄与することになる。一般に、コンポーネント数が N の場合の総シーケンス数 N_s^{total} は、

$$N_s^{total} = \sum_{l=1}^N \prod_{k=l}^N k \quad (1)$$

で与えられる。5 コンポーネントでは、325 シーケンスであり、この中から、インテグリティに寄与するシーケンスのみを抽出し、そのインテグリティリスクを積算する。 n 個のコンポーネントが故障する場合において、 i 番目に故障するコンポーネントの故障率を λ_i ($i=1,2,\dots,n$) とした場合、そのシーケンスの時刻 t におけるインテグリティリスクは

$$I(t)_{1,2,\dots,n} = \prod_{j=1}^{n-1} \left\{ 1 / \left(\lambda_{j+1} \sum_{i=1}^{j+1} \frac{1}{\lambda_i} \right) \right\} \\ \times t^n \times \prod_{j=1}^n \lambda_j \quad (2)$$

で表される。インテグリティリスクに寄与するシーケンスのインテグリティリスク値を (2) 式で計算したのちにすべて積算することで時刻 t において既に存在するインテグリティリスクが計算可能である。

OR ロジックでは、トランスポンダが故障した段階で 1 つのモニタが有効に働けば適切にシャットダウンできるため、2 つのモニタチェックが故障した後に対応する 2 つのモニタがそれぞれ故障し、その後にトランスポンダが故障するシーケンスのみインテグリティに寄与する。しかし、AND ロジックでは 1 つのモニタチェックが故障し、対応するモニタが故障するだけでトランスポンダの故障を検知できなくなるため、インテグリティリスクの積算値は大きくなる。

4.3 時刻 $t \sim t+h$ におけるインテグリティリスク計算方法

時刻 $t \sim t+h$ におけるインテグリティリスクは、時刻 t における故障の状態から $t+h$ の故障状態へ変化する際のインテグリティリスクに寄与する故障発生確率を積算することにより求まる。5 コンポーネントの場合には、243 通りの状態変化がある。インテグリティリスクに寄与する状態変化としては、例えば時刻 t においてモニタチェック#1 のみが故障している状態で、 $t+h$ でモニタ#1 とトランスポンダが壊れる状態であり、AND ロジックの場合においてのみ寄与する。その確率は

$$I(t) = \lambda_{TX} \lambda_{MON1} \lambda_{MIT1} t h^2 \quad (3)$$

となる。なお、 λ_{TX} 、 λ_{MON1} 、 λ_{MIT1} はそれぞれ、トランスポンダ、モニタ#1、モニタチェック#1 の故障発生確率 (/h) である。インテグリティに寄与するのは $t+h$ でトランスポンダが故障する状態変化のみとなる。

4.4 AND と OR での計算結果の比較

時刻 $t \sim t+h$ の状態変化において $h=1$ とすることで単位時間あたりのインテグリティリスクとなる。各コンポーネントにおける故障率を $\lambda_{TX} = 10^{-6}$ 、 $\lambda_{MON1} = \lambda_{MON2} = 10^{-5}$ 、 $\lambda_{MIT1} = \lambda_{MIT2} = 10^{-6}$ [6] とした場合の AND ロジックと OR ロジックでの運用時間に対するインテグリティリスクの計算結果を図 2 に示す。END to END 試験によりトランスポンダの故障は存在していないことが示されるため、インテグリティリスクはゼロに戻ることになる。よって、END to END 試験は要求されるインテグリティ（確率）に到達する前に行う必要があり、メンテナンス作業を意味することになる。インテグリティの要求値は WG-107 で議論中であるが、 $10^{-7}/h$ とすることが考えられており、END to END 試験は 1 年（少なくとも 3 か月）が想定されている。図 2 より、OR では 50,000 時間（2083 日）まで 10^{-7} に達しないが、AND ロジックでは 5,000 時間（208 日）で達することが分かる。具体的な数値で比較すると、例えば $t=10,000h$ において、OR モニタのインテグリティ

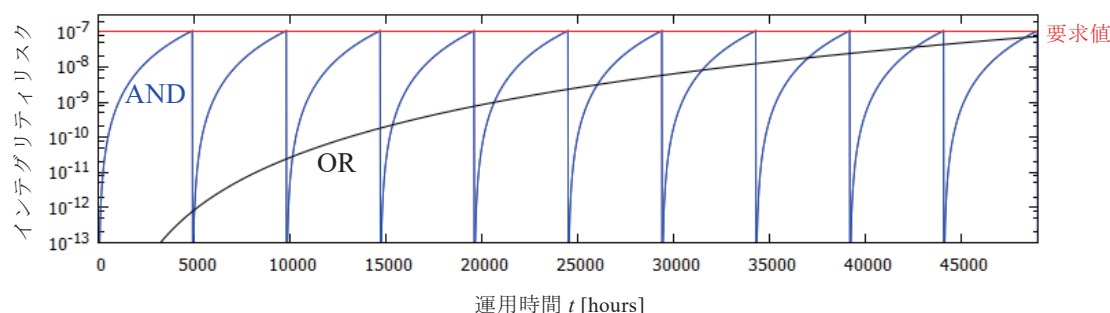


図2 AND・OR ロジックのインテグリティリスクの違い

ティリスクが $2.56 \times 10^{-11} / \text{h}$ になるのに対し、AND モニタでは $9.61 \times 10^{-7} / \text{h}$ となる。

AND ロジックと OR ロジックのシーケンス比較した場合、OR ロジックでは時刻 t において5コンポーネントすべてが故障する場合においてのみインテグリティリスクに寄与する。すなわち、モニタ1つが壊れていなければ、そのモニタがトランスポンダの故障を検出し、モニタチェック1つが壊れてなければモニタの故障を検出し、シャットダウンが可能である。シーケンス数は6通りあるが、そもそも5コンポーネントすべてが故障する同時確率は小さい。

一方で AND モニタは3コンポーネントの故障からインテグリティリスクへ寄与することになる。モニタを両方とも正常な状態とする必要があり、モニタチェック1つが故障した後に対応するモニタ1つが故障し、トランスポンダが故障する3故障シーケンスからインテグリティリスクへ寄与することとなる。すなわち、図2で示す差は、3故障の同時確率が5故障よりも大きいことが原因である。

$t \sim t+h$ の状態変化によるインテグリティリスクについては、OR ロジックでは16の状態変化がインテグリティに寄与するが、AND ロジックでは33通りに増大する。しかし、本検討における計算条件では、前述の時刻 t に至るまでのインテグリティリスクが大きく、支配的であった。

5. まとめと今後の課題

本研究では5コンポーネントで AND と OR のロジックの違いによるインテグリティリスクの差を検証し、影響するシーケンスや状態変化の傾向を定量的に示した。実際には制御回路や

シャットダウン経路の故障も考慮した7コンポーネントで扱う必要がある。7コンポーネントの場合、シーケンス数は13,699通りに増大し、この中から影響するものを抽出することとなる。さらに、現在運用中のDME地上局に十分なインテグリティの性能を有するか否かは運用中の機器での故障率を用いる必要がある。

今後は、AND ロジックにおいてインテグリティリスクを小さくする手法について検討する予定である。

謝辞

EUROCAE WG-107 の活動において貴重なご助言をいただいております航空保安無線システム協会 調査役 横田豊八様に感謝いたします。

参考文献

- [1]PBN 導入展開計画, 第10回 CARATS 推進協議会資料,2020年3月19日
- [2]Bill Carey, "Aviation Groups Seek Action On GNSS Vulnerability," Aviation Week & Space Technology, Sep 26, 2019
- [3]ICAO WRC19 RPG42, Bangkok, Thailand, 27-28 Mar.2017
- [4]Valeriu Vatan et al., "Research on Alternative Positioning Navigation and Timing in Europe," Proc. of 2018 ICNS, pp.4D2-17, April, 2018
- [5]G. E. Berz, V. Vitan, I. Skyrda, P. B. Ober, "Can Current DME Support PBN Operations with Integrity?," Proc. 26th ION GNSS+2013, Nashville, Sep. 16-20, 2013
- [6]Luca Saini, "ED57A Deviation of Integrity risk per unit time," EUROCAE WG-107 Meeting Document, Brussel, 1st-3rd October, 2