

5. メッシュ型航空機間コンピュータネットワークの提案

長崎県立大学 ※金谷 一朗

1 まえがき

本研究は、CDO (Continuous Descent Operation) のための FIM (Flight-deck Interval Management) における情報フローの設計に関するものである。

航空機の運用においてエネルギー効率を良好に保つことは航空業界全般において重要な課題であり、世界的な注目を浴びている。CDO は到着機がアイドリングに近い状態で滑走路に連続降下する運航であり、エネルギー効率が良いことが我が国を中心とした最近の研究成果によって明らかにされている。そのため特に高密度運航時における CDO に関する基礎的研究ならびに開発は極めてタイムリーな課題であるばかりでなく、我が国が主導的に研究を進める千載一遇の機会でもある。

その一方、現在研究が進行している ASAS (Aircraft Surveillance Applications System) を用いた運航システムだけでは今後激増する到着機の運航管理をカバーできないことが指摘されている。ASAS は従来の航空用放送サービス (ADS-B) を利用して機上で周囲の交通流の監視を可能にするシステムであるが、その情報は極めて限られたものであり、またブロードキャストをベースとしたものであるため高度な情報通信は全く不可能であり、FIM における情報フローの抜本的設計が必要である。

そこで著者は現在研究が進行している CDO について計算機科学者の立場から詳細な検討を行い、その結果 FIM という概念の重要性を認めるものの、従来の情報フローの設計はいまだ緒についたところであることを結論し、最新の計算機科学、情報科学の知見に基づいた航空機間計算機ネットワークを用いた FIM における新たな情報フローを設計提案する。

2 OSI 基本参照モデル

研究の焦点を明確にするために、まず最初にコンピュータネットワークに関する OSI (Open Systems Interconnection) 基本参照モデルを紹介する。ついで、OSI 基本参照モデルを参照しつつ移動体通信に関する従来技術を俯瞰する。

OSI 基本参照モデルは、コンピュータの持つべき通信機能を階層構造に分割したモデルであり、ISO によって策定されている。その特徴は通信機能（通信プロトコル）を7つの階層に分けたことで、従来計算機科学者が好んで使った「TCP/IP 群」と呼ばれる分類方法とは上位互換性がある[1]。すなわち、アプリケーション層、プレゼンテーション層、セッション層は TCP/IP 群のアプリケーション層に対応し、トランスポート層は TCP/IP 群のトランスポート層に対応し、ネットワーク層は TCP/IP 群のネットワーク層またはインターネット層に対応し、データリンク層、物理層は TCP/IP 群のリンク層に対応する。

以下、OSI 基本参照モデルに沿って議論を進める。

2.1 物理層・データリンク層

移動体通信として普及している IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16m, LTE (Long Term Evolution) の3種について俯瞰する。これらの規格は、物理層、データリンク層に関するプロトコルである。

IEEE 802.11a/g/n/ac

IEEE 802.11a/g/n/ac (いわゆる Wi-Fi) は無線を用いた物理層・データリンク層プロトコルである。使用される無線周波数帯は 2.4-2.5[GHz], 4.9-5.0[GHz], 5.03-5.091[GHz], 5.15-5.35[GHz], 5.47-5.725[GHz] であり、主要な帯域は SHF 帯 (波長 10-100[mm]) に属す。デジタル信号を互いに直交する複数のサブキャリアに分散させ、各サブキャリアを直角位相振幅変

調 (QAM: quadrature amplitude modulation) する、直交周波数分割多重方式 (OFDM: orthogonal frequency-division multiplexing) による変調を行う[3]。

IEEE 802.16m

IEEE 802.16m（いわゆるモバイル WiMAX2）は、IEEE 802.11a/g/n/ac シリーズよりも広いエリアを対象とした無線を用いた物理層・データリンク層プロトコルである。わが国では 2.575-2.645[GHz] を使用しており、周波数帯は UHF 帯（波長 100-1,000[mm]）に属す。変調方式は基本的には IEEE 802.11a/g/n/ac シリーズと同じく OFDM である[4]。

LTE

LTE (Long Term Evolution) 規格。携帯電話用の規格であり、マーケティング上”3.9G”とも”4G”とも呼ばれる。わが国ではおおよそ 0.7-1.7[GHz] の間を「虫食い」的に使用しており、帯域は UHF 帯に属す。各サブキャリアを位相偏移変調 (QPSK: phase-shift keying) する OFDM を用いている点が前述の IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16m とは異なっている[5]。

既存の航空機無線技術

上述の IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16m, LTE がそれぞれ新規に UHF/SHF アンテナを必要とするのに対し、原理的には航空機がすでに搭載しているアンテナを活用する方法もある。

航空機は二次監視レーダー (SSR: Secondary Surveillance Rader) として 1-3[GHz] の UHF 帯を用いた極めて初歩的な通信を行っている。また 118.0-136.975[MHz] の VHF 帯（波長 1-10[m]）を用いた音声コミュニケーションチャネルも使われている。音声は振幅変調 (AM: amplitude modulation) される。

2.2 ネットワーク層

ネットワーク層プロトコルは、データリンク層に十分な通信帯域がある場合には IP (Internet Protocol) が事実上の標準である。また惑星探査機と地球との交信などの極端に帯域が狭い場合も Space Communications Protocol Specifications (SCPS) に代表される IP をベースとした通信プロトコルが多用されている[6]。

ここで重要なことは、IP および IP をベース

とした通信プロトコルはルーティングのみを扱い、通信経路で発生するエラーに関しては全く承知しないことである。すなわち、ネットワーク層ではデータの喪失・誤り・重複は訂正されない。

2.3 トランスポート層

トランスポート層は、ネットワーク層で無視された通信のエラーに対処するための層と捉えることができる。実際、通信経路の両端でエラーフリーを保証する TCP (Transmission Control Protocol) はインターネットで利用される代表的なトランスポート層プロトコルである。

またエラー訂正を行わない UDP (User Datagram Protocol) も存在する。トランスポート層に UDP を採用した場合、データの喪失・誤り・重複を覚悟する必要がある。ただしデータをパケット（データグラム）単位で送受信するため、不完全なパケットは上位層へ伝える前に捨てることのできる[7]。

2.4 セッション層以上の上位層

セッション層以上の層に関しては本研究の対象とならないため議論を割愛する。

ここでは、電子航法研究所研究発表会講演概要の原稿を執筆する際に必要なことを解説します。

3. 提案プロトコルの設計方針

前章では従来の無線ネットワーク技術を紹介したが、航空機という制約上、FIM を利用した CDO のために使うためには不満足であり、一部新規の技術が必要である。

IEEE 802.11a/g/n/ac, IEEE 802.16m, LTE とも新規のアンテナを航空機に装備する必要があり、また OFDM による 2 次変調を行っていることから高速移動や電波干渉に弱みを持つことが予想され、本研究目的においては採用は困難である。

そこで、物理層、データリンク層に航空機に既存の無線技術を仮定し、新たに既存の低速（1[kbps]から 10[kbps]程度）無線ブロードキャスト技術を用い、航空機間ネットワークを用いて情報フローを管理する手法を考案する。必ずしもすべての航空機がすべての航空機と直接通信可能な距離にいないことを考慮し、中間にいる航空機によるデータの中継を考慮する。この

中継を以降は「ホップ」と呼ぶ。

具体的には、以下のような通信プロトコルを設計し、シミュレーション実験によってその有効性を確認する。

物理層

狭帯域無線通信を想定する。具体的には、既存の航空機への搭載への実現可能性を鑑み、SSRとアンテナを共用するUHF帯を想定する。変調方式はデジタル信号に適し、ノイズ耐性の高いFM変調とする。

データリンク層

送信したいデータを圧縮し、送信元、タイムコードなどを含むメタデータを付加したパケットを作成し、送受信する。（データリンク層で送受信する信号ブロックをパケットと呼ぶ。）

ネットワーク層

受信したデータをデコードし、必要なら再送信する。ネットワーク層で送受信する信号ブロックをデータグラムと呼ぶ。

トランスポート層

受信したデータをデコードし、データに異常があれば捨てる。異常がなければ上位層へとデータを流す。トランスポート層で送受信する信号ブロックをユーザデータグラムと呼ぶ。

データリンク層から物理層へデータを渡す時点でのパケットサイズを概ね 256[octet]とする。最低限必要なメタデータとして

パケットの性質を表すコード（最大 4[octet]）

日時を表すタイムコード（4[octet]）

機体を表すコード（4[octet]）

エラー検出用コード（最大 4[octet]）

を見積もると、データグラムに 240[octet]を確保できる。データリンク層の通信帯域として 2[kbps]を確保したとすると、1パケットの送信に 1[s]が必要になる。なお 2[kbps]の通信帯域は、UHF帯を用いたFM変調によるデジタル通信はもちろん、VHF帯を用いたAM変調搬送でも十分可能であるため、現実的な帯域幅である。

ネットワーク層からデータリンク層への受け渡しデータには

データグラムの性質を表すコード（最大 4[octet]）

送信先機体コード（4[octet]）

送信元機体コード（4[octet]）

送信時刻コード（4[octet]）

を含める。データグラムの性質を表すコードに 4[octet]を割り当てると、データグラムのユーザ領域すなわちペイロードのサイズは 224[octet]となる。

インターネットと異なり航空機間通信では end-to-end のデータ保証を行うことは極めて困難であるため、トランスポート層ではデータの再送信要求など TCP の特徴である「コネクション」機能は考慮しない。一方で、比較的強力なエラー訂正機能はトランスポート層で実装する。リード・ソロモン符号 RS がその最有力な候補である。データグラム 3 個分のデータをエラー訂正信号とあわせてデータグラム 4 個に分散させて送信すると、1 データグラムあたり平均して 168[octet]の情報量となる。

4. 物理層・データリンク層・ネットワーク層のフィジビリティ検証実験と結果

前章で述べた提案プロトコルのフィジビリティを検証するために、シミュレーション実験を行った。具体的には、情報が成功裏に 1 ホップする確率に正規分布を仮定し、以下の二つの調査を行った。

シミュレーション 1

情報の伝達速度。通信経路が不安定な状態で、近隣の航空機を経由したマルチホップ通信を行った場合の、時間経過に対する情報伝達の度合い

シミュレーション 2

情報の伝達速度。通信経路が不安定な状態で、近隣の航空機を経由したマルチホップ通信を行った場合の、時間経過ごとの総ホップ数
シミュレーション 1 の結果を図 1 に、シミュレーション 2 の結果を図 2 に示す。

図 1 は、横軸に経過時間 (generation) をとり、縦軸に情報が伝達された機体数 (最大 1,000) をとったものである。パラメタ K は正規分布における分散の逆数である。青色で $K=0.100$ 、緑色で $K=0.316$ 、黄色で $K=1.00$ を示している。

図 2 は、横軸に経過時間 (generation) をとり、縦軸に情報の伝達に要した総ホップ数をとったものである。青色で $K=0.100$ 、緑色で $K=0.316$ 、黄色で $K=1.00$ を示している。

5. フィージビリティ実験結果に対する考察

シミュレーション1の結果から、 $K=0.316$ において、通信開始後30秒の時点でおおよそ97.7%の情報伝達が成功していることがわかる。ここに本モデルにおける理論上のデータ到達率が72.9%であるのに対し、30秒かければ距離に関係なく97.7%の伝達率すなわち134%の改善が見込まれることがわかる。

シミュレーション2の結果から、情報伝達に必要な総ホップ数は経過時間に伴って減少する傾向が見られる。

上述の通り、極めて信頼性の低い通信環境においても、空域中に航空機が分散している状況を利用することで信頼性の高い通信が可能であることが明らかになった。本シミュレーションの条件下では、通信開始後30秒で97.7%の正確なデータが航空機間で共有されたことになる。このときのデータグラムサイズが224[octet]であるから、トランスポート層でのエラー訂正を除いて、データ伝達率98%を保証するときのデータレートが最悪時約60[bps]であることを示す（最善の場合は理論値である約1.8[kbps]）。

これは、近代的な無線通信手段としては極めて狭い帯域の通信に見えるが、ミッションクリティカルな航空機間通信としては十分フィジブルな数値であり、実用可能であると言える。また非ミッションクリティカルな通信には通信衛星を用いた方法を検討すればよく、その場合本提案とは相互に補完する関係になる。

6. まとめ

本研究によって航空機間のネットワーク構築が可能になった場合、その応用範囲はCDOにとどまらず、近接する航空機の自律制御に応用可能である。また移動する航空機というダイナミックなノードを扱うコンピュータネットワークは、近年盛んに研究されているモバイル計算機ネットワークの中でも特異なものであり、本研究が先鞭をつけることで、今後計算機ネットワークの研究者による大きな貢献も期待できる。また本研究提案における計算機ネットワーク設計のネットワーク層にIPを用いることで、研究成果は例えばヒューマン・イン・ザ・ループ

実験室での実験にも応用できるなど極めて適用範囲が広い。

参考文献

- [1] 小野 欽司: OSI プロトコル絵とき読本; オーム社, 1989. ISBN: 978-4274075308
- [2] Kevin R. Fall, W. Richard Stevens: "TCP/IP Illustrated, Volume 1 -- The Protocols [2nd Ed.]"; Addison-Wesley, 2014. ISBN: 978-9332535954
- [3] Neil P. Reid, Ron Seide: Wi-Fi (802.11) Network Handbook; Osborne Networking, 2002. ISBN: 978-0072226232
- [4] K. Fazel and S. Kaiser: "Multi-Carrier and Spread Spectrum Systems: From OFDM and MC-CDMA to LTE and WiMAX [2nd Ed.]"; John Wiley & Sons, 2008. ISBN 978-0-470-99821-2
- [5] Erik Dahlman, Hannes Ekstrom, Anders Furuskar, Jonas Karlsson, Michael Meyer, Stefan Parkvall, Johan Torsner and Mattias Wahlqvist: The long-term evolution of 3G; Ericsson Review, No. 02, 2005.
- [6] Karanjit S. Siyan: "Inside TCP/IP, Third Edition"; ACM, 1997. ISBN: 1562057146
- [7] Internet Engineering Task Force: RFC768. <https://tools.ietf.org/html/rfc768>
- [8] R. Shipley: Secondary Surveillance Radar in ATC Systems: A description of the advantages and implications to the controller of the introduction of SSR facilities; Aircraft Engineering and Aerospace Technology, Vol. 43, Iss. 1, pp.~20-21, 1971.
- [9] M. Matsumoto and T. Nishimura: "Mersenne Twister: A 623-dimensionally equidistributed uniform pseudorandom number generator"; ACM Trans. on Modeling and Computer Simulation, Vol. 8, No. 1, pp. 3-30, 1998. DOI: 10.1145/272991.272995
- [10] 江藤良純, 金子敏信: 誤り訂正符号とその応用; オーム社, 1996. ISBN: 4-274-03486-0

付録-1

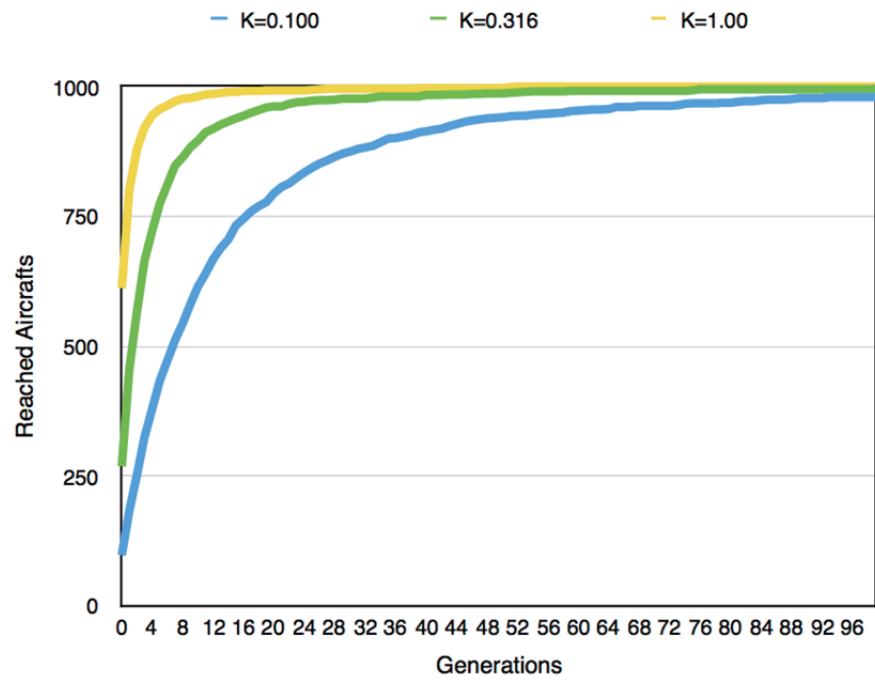


図1 情報の伝達速度

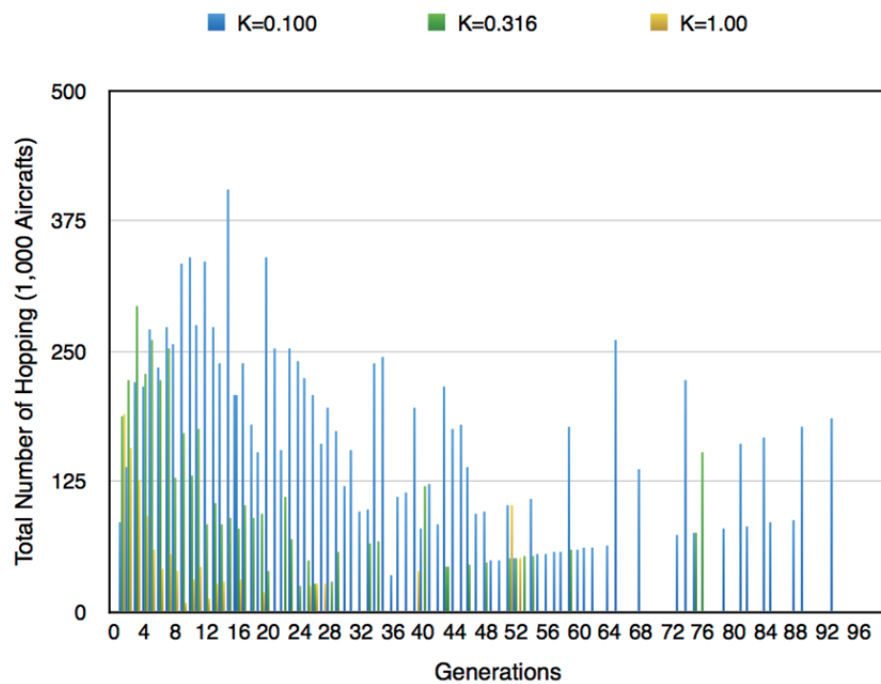


図2 情報の伝達に要した総ホップ数

付録-2

提案する航空機間通信プロトコル

物理層

既存の航空機への搭載の実現可能性を鑑み、SSRと同様の周波数帯（UHF帯）を用いる。そのためSSR用アンテナを流用することが可能になる。

既存のSSRは単純なパルスを使った通信プロトコルを用いているため、通信帯域は非常に狭い。そこで隣接する周波数をキャリアとする概ね10[kHz]程度の帯域を確保し、FM変調を行う。一般に航空機間通信は通信チャネルの選択度をあえて下げるためにAM変調が用いられるが、本提案はデジタル通信に限ったものであるため、AM変調よりもノイズに強いFM変調を採用する。（これは総務省による電波形式表示に従えばF1E変調型式に相当する。）

データリンク層

256[octet]を1パケットとしてデータの送受信を行う。データの内容は以下の通りとする。

パケットヘッダ 4[octet].マジックナンバー（信号識別用の定数）、パケットの性質を表すフラグ、予約領域を含めて4[octet]の情報とする。パケットの性質には、転送回数を示す1[octet]の情報を含める。

タイムコード 4[octet].パケット送信時の2000年原点のエポックタイム（2000年1月1日00:00:00UTCからの経過秒数）。

機体コード 4[octet].送信元の機体コード。機体ごとにユニークな番号を割り振る。

データグラム 240[octet].データ本体。

¥item[エラー検出コード] 4[octet].パケット全体の誤り検出符号。巡回冗長検査の検査の一種であるCRC-32を用いる。

誤りを含むパケット、事前に決められた閾値よりも古いパケットは受信しても捨てる。

ネットワーク層

ネットワーク層は受信データの再送信を行う。ネットワーク層の負荷を最小限にするために、パケットの生存期間（time to live）の管理のみを行う。

データグラムヘッダ 4[octet].データグラムの性質を表す。

送信先機体コード 4[octet].送信先の機体コード。

送信元機体コード 4[octet].送信元の機体コード。

送信時刻タイムコード 4[octet].データグラム送信時の2000年原点のエポックタイム。データリンク層のタイムコードと異なり、ホップしても変化しない。

ペイロード 224[octet].データ本体。

トランスポート層

巡回冗長検査よりも強力なエラー訂正機能であるリード・ソロモン符号をトランスポート層で実装する。データグラム3個分のデータをエラー訂正信号とあわせてデータグラム4個に分散させて送信すると、1データグラムあたり平均して168[octet]の情報量となるが、この比率は実装者に委ねられる。