

3. 衛星利用ADSの伝送特性改善について

衛星技術部 ※石出 明 藤田 光紘 北折 潤*
*航空システム部

1. まえがき

洋上管制では、航空機の位置通報に短波の無線電話が用いられてきたが、現在一部で衛星利用の自動従属監視(ADS)も試行運用が開始されている。

電子航法研究所では、ICAOの衛星データ通信技術基準(AMSS SARPs)に基づくビット指向型の衛星データ通信及びそれを利用したADSの実験システムを開発して、実際の衛星実験によりその性能の評価を行った[1][2]。その後、実験システムを室内実験用に改造し、4台の航空機地球局(AES)を用いて様々な通信回線の条件に対してADS等のデータ伝送性能を評価した[3][4]。航空通信ネットワーク(ATN)やFANS-IでADSレポートを伝送する場合、レポート長がかなり大きくなるので、Tチャンネルが用いられるものと考えられる。しかし、Tチャンネルのプロトコルを用いると、一般にデータ伝送遅延時間が大きく、また通信回線の輻輳で伝送遅延時間が増加する。そこで、伝送遅延時間を短縮し、かつ通信回線輻輳の影響による伝送遅延時間の増加が発生しない方式についてその実現性を検討した。

本報告では、まずADSの概要を述べる。次に、ADSレポートの伝送に用いられるTチャンネルの標準プロトコルとそれを用いた室内実験の結果について述べる。次に、伝送速度を大きくしたときの伝送遅延時間の測定結果について述べ、Tチャンネルの標準プロトコルの問題点を明らかにする。最後に、ADSレポートの伝送に適した方式について検討し、実現可能な性能についても言及する。

2. ADSの概要

ADSは航空機搭載の航法機器で得られる位置等の情報をデータ通信により定期的に地上の管制センターに伝送して、管制官が航空機の位置を監視するシステムである。このADSレポートで伝送する情報(データ)の種別は表1のようにICAOで規定されている。ADSは基本的には航空機の位置を監視するものであるから、航空機の位置や高度を含む基本ADSが重要で

あり、送信するADSレポートには必ず入っていないなければならない。その他の情報は航空管制センタから後述するコントラクト要求で指定されたときのみ伝送することになっている。

ADSレポートのタイプとしては主として周期的レポート、イベントレポート及びデマンドレポートの3つがある。このうち、イベントレポートは高度、速度、経路からの逸脱量等が設定した値を超えて変化する等の事象が起きたときに送られるもの、デマンドレポートは、管制官から必要に応じてリクエストされたときに送られるものでどちらも不定期に行われる。一方、周期的レポートは通常飛行中の航空機位置を定期的に監視するためのもので、一般にはこのタイプがよく知られている。本報告では、この周期的レポートに限定して述べる。

表1 ADSの伝送項目

ブロック	データ内容	データ長 (octet)
基本ADS	緯度,経度,高度,時刻,FOM	11
グランドベクトル	トラック角,対地速度,昇降率	6
エアベクトル	ヘディング,マッハまたは対気速度,昇降率	6
フライトID	フライトID	7
機体ID	24ビットICAOアドレス	4
気象	風速,風向,温度,タービュランス	6
予定経路	各ウェイポイントの緯度,経度,高度,予定時刻	18
中期的予定針路	ある地点までの距離,真のトラック角,高度,予定時刻	9
短期的予定針路	次のウェイポイントの緯度,経度,高度,予定時刻	10

3. Tチャンネルの標準プロトコル

図1にTチャンネルの標準プロトコルを用いたときのADSレポートの伝送シーケンスを示す。ADSレポートの伝送には、その長さによってRチャンネルかTチャンネルのどちらかが使用される。伝送されるユーザーデータ(サブネットワークレイヤからデータリンクレイヤに渡される情報)の長さが33octet以下であればRチャンネル

が使用され、それより長い場合はTチャンネルが使用される。しかし、元の情報は最小の基本ADSで11octetであるが、航空通信ネットワーク(ATN)でこのADSレポートを送ろうとすると、ネットワークレイヤ以上のレイヤで付加されるヘッダの長さが100 octetを超えるので、実際にはTチャンネルがADSレポートの伝送に使用されると思われる。

このプロトコルでは、まず航空管制センターからコントラクト要求を航空機地球局(AES)に向けて送信する。AESではコントラクト要求を受信すると、そのリクエストで指定された内容のADSレポートを作成し、送信バッファに保管して、航空地球局(GES)に対してTチャンネルの送信スロットの割り当て要求を送る。これに対してGESは、既に割り当てられている送信スロットと重ならないようにTチャンネルの送信スロットを割り当て、その情報をAESに送信する。AESは送信バッファに保管されている送信データを割り当てられたTチャンネルの送信スロットで送信する。以降航空管制センターからコントラクト解除要求がAESに送られるまで定期的にこの手順が繰り返される。

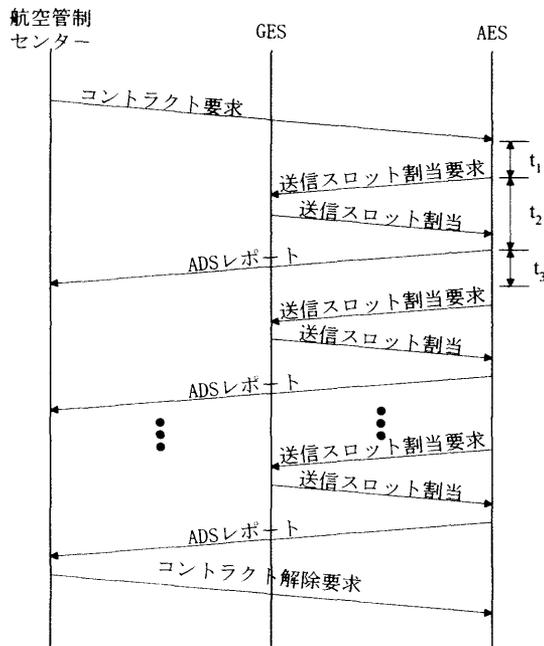


図1 Tチャンネル標準プロトコル伝送シーケンス

図2にTチャンネルを用いてデータ伝送するときのタイムチャート例(データ長約100octet)を示す。AESでADSレポートを生成するのに要する時間 t_1 、送信スロット割り当て要求を送

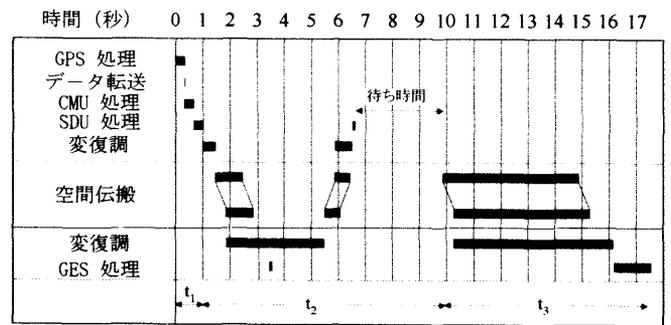


図2 Tチャンネル伝送のタイムチャート

ってから送信時刻までの時間 t_2 、ADSレポートの伝送に要する時間 t_3 とすると、伝送遅延時間は $t = t_1 + t_2 + t_3$ となる。このように従来のTチャンネル標準プロトコルでは、ADSレポートを送信する毎にGESからTチャンネルの送信スロットの割り当てを受けるプロセスが必要なためその分 (t_2) 伝送遅延時間が大きくなる。図3

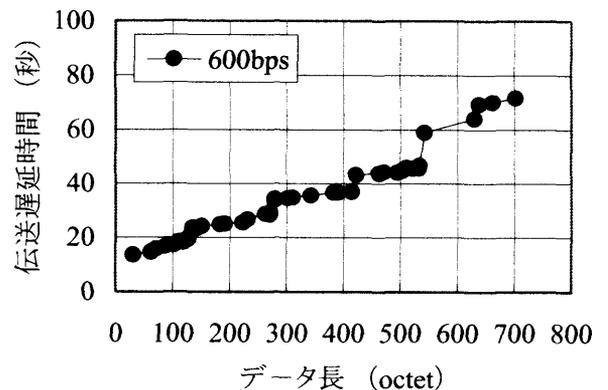


図3 Tチャンネルの伝送遅延時間特性

に伝送速度 600bps の場合についてデータ長を変えて測定した伝送遅延時間を示す。この図から、伝送速度 600bps ではデータ長 230octet(前述の基本ADSブロックをATNで伝送する場合のデータリンクレイヤでのデータ長[5])の場合、伝送遅延時間は約26秒となる。

この方式におけるもう一つの問題は、他のADSや管制官-パイロット間データ通信(CPDL)の通信とチャンネルを共用するため、通信回線の輻輳により伝送遅延時間が増加することである。図4は、データ長を230octetとして、AES数と送信間隔を変えたときの伝送遅延時間(平均, 95%)を測定した結果である。ADSレポートは等間隔で発生するが、他の通信はランダムに発生する。通信が多い状態を考えると、両者が同時に発生することが増え、さらにP及

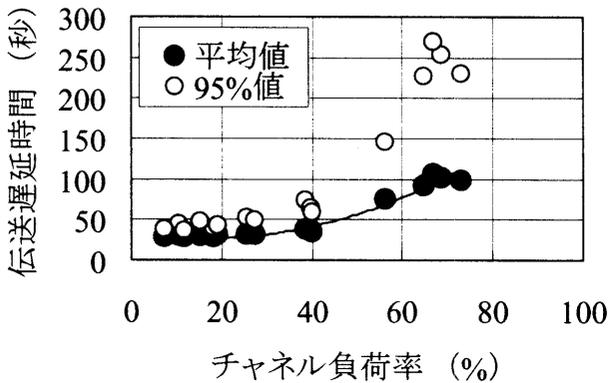


図4 通信輻輳時のTチャンネル伝送遅延時間

びRチャンネルでの伝送データも同時に発生することが多くなるので、データの発生はランダムに近くなると思われる。そこで、データ送信間隔の分布を指数分布とし、同一長のデータを平均送信間隔を変えて伝送を行い、そのときの伝送遅延時間を評価した。この結果から、通信回線が輻輳するに従って伝送遅延時間が増加することがわかる。

図5は、Tチャンネルの伝送速度を600bps、1200bps及び10500bpsとした場合について伝送遅延時間を測定した結果である。ただし、P及びRチャンネルの伝送速度は600bpsとした。この結果から、標準プロトコルを用いた場合、データ長を230octetとすると、伝送遅延時間は600bpsでは約26秒、1200bpsでは約18秒、10500bpsで約11秒である。このように、伝送速度を増加すれば伝送遅延時間はかなり短縮できる。なお、Tチャンネルの伝送速度10500bpsの場合、P及びRチャンネルの伝送速度も10500bpsにすると、伝送遅延時間は約6秒になる。しかし、伝送速度を10500bpsとするには、衛星側に

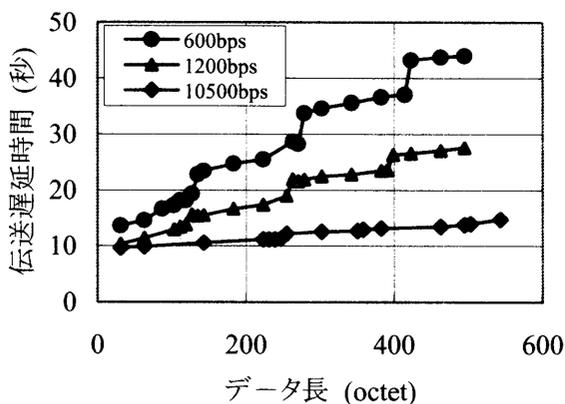


図5 伝送速度に対する伝送遅延時間特性

グローバルビームアンテナを用いた場合、AESに利得12dBi程度のアンテナが必要となる。旅客機等の大型の航空機ではこの程度のアンテナを積むことは可能であるが、小型の航空機では困難である。また、通信回線が輻輳すると、伝送遅延時間は増加することになる。伝送遅延時間の増加によりADSレポートが地上に届く時間は不定期になる問題もある。

4. Tチャンネルの標準プロトコルの問題点

前述したように、Tチャンネルの標準プロトコルでADSレポートの伝送を行う場合には、以下に掲げるいくつかの問題点が考えられる。

- (1) ADSレポートの正味の情報量は少なくとも、ATNの上位層のヘッダが多量に付加されるため、実際に伝送されるデータ量は大きくなる。したがって、送信スロットの割り当てを必要とするTチャンネルが使われるので、伝送遅延時間が大きくなる。
- (2) Tチャンネルの標準プロトコルは、元々監視用というよりはデータを相手方に確実に伝送することを重視しているため、伝送に失敗したデータは再送する手順になっている。このため、通信回線が輻輳すると伝送遅延時間は増大する。
- (3) 伝送遅延時間の増加により、地上に届くADSレポートの間隔は不均一となる。

このような問題点を解消し、どのような航空機でも使用でき、かつ現在陸地上空で使用されている二次監視レーダ(SSR)にできるだけ近い性能を実現できないか検討した結果を以下の節で述べる。

5. 新たなADS伝送方式の検討

5.1 基本概念

現在のICAO AMSSに基づくADSで発生する回線の混雑による伝送遅延時間の増大、伝送間隔の不均一化等の問題を解消するため、新たな

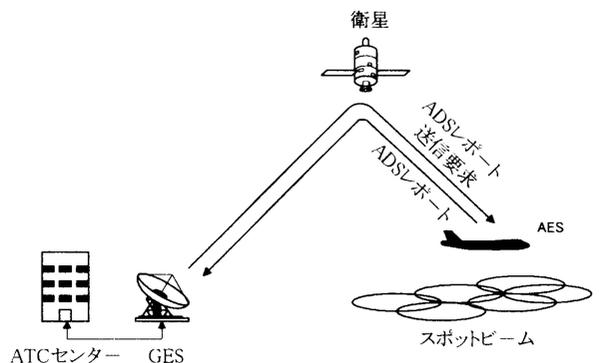


図6 ポーリング方式ADSの概念図

に考案したポーリング方式 ADS について述べる。なお、衛星は静止衛星で、航空機側に低利得アンテナを用いるために、スポットビームを使用することとする。図 6 にポーリング方式 ADS の概念を示す。

5.2 送信情報内容

航空機の位置の監視というADSの基本的な役割から考えれば ADS で伝送する情報として表 1 の基本 ADS ブロックの情報があれば最低限良いと考えられる。SSR で得られる情報が位置、高度であることからすればこれは妥当な条件と考えられる。そこで、本検討では基本 ADS ブロックだけを伝送するものとする。このデータは、AMSS SARPs で規定されているサブネットワークレイヤのヘッダを除けば 11octet であり、図 7 に示すようにRチャンネル SU (Signal Unit: 伝送パケットの最小単位) のユーザーデータ・フィールドに納まるものである。そこで本検討では、このRチャンネル SU のフォーマット (19octet) をそのまま流用する。

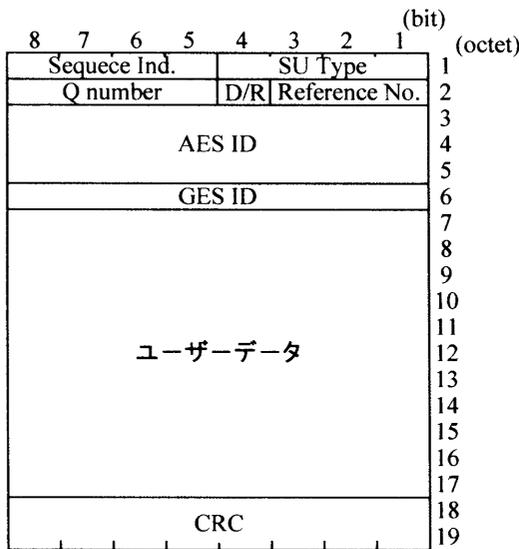


図 7 Rチャンネル SU のフォーマット

5.3 伝送速度と ADS レポート長

前節で述べたように ADS レポートを伝送する信号としてはRチャンネルのバースト信号を流用する。インマルサットシステム定義書 (SDM) によると、伝送速度とRチャンネルバースト信号 (ADS レポート) 長の関係は表 2 のようになる。

表 2 伝送速度とRチャンネルバースト長

伝送速度 (bps)	バースト長 (秒)
600	0.96
1200	0.46
2400	0.21
4800	0.1269
10500	0.0846

5.4 アクセス方式

AMSS SARPs によるデータ通信方式では、異なる航空機の ADS レポートや他のデータ通信と混在するために伝送データ間の競合が起こるため伝送遅延時間が増加したり、ADS レポートの伝送間隔が不均一になったりする。このようなことを避けるためにここではポーリング方式を採用する。すなわち、図 8 に示すように地上側から一定間隔で各 AES に順次 ADS レポート送信要求を送信して、これに対して各 AES から ADS レポートを送信する方式である。この方式では一つのチャンネルで一時に扱う AES の数が一つだけなので伝送データの競合がなく、また伝送

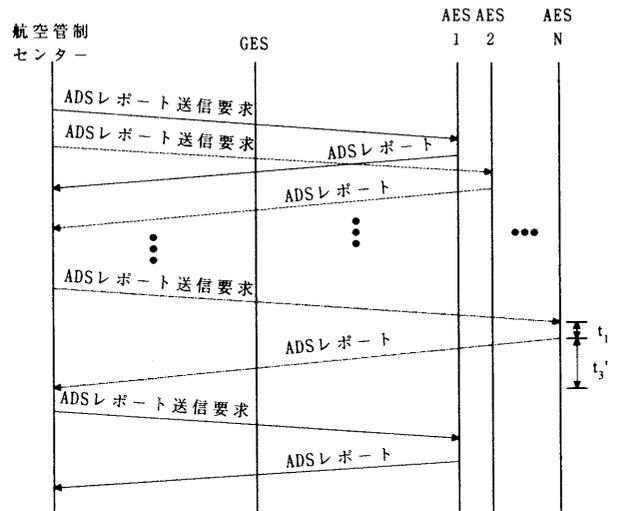


図 8 ポーリング方式の伝送シーケンス

間隔及び伝送遅延時間もほぼ一定に保つことができる。アップリンク及びダウンリンク各1チャンネルで一定の数の AES を扱う。GES では ADS レポートを受信すると、受信信号に含まれる CRC (Cyclic Redundancy Check) により誤りが検出されればその ADS レポートを棄却する。(AMSS SARPs では CRC により誤りが検出されたときはそのデータの再送を行う。したがって、データは確実に伝送できるが、伝送遅延時間は増加する。) ADS レポート送信要求はここでは ADS レポートと同一のフォーマットとするが、実際にはもっと簡単なフォーマットでかまわない。

基本的には1スポットビーム当たりアップリンク、ダウンリンク各1チャンネルとする。各 AES 当たりの ADS レポート伝送間隔を SSR と同じ 10 秒として(すなわち 10 秒に1回各 AES の位置を監視するとして)、伝送速度と1スポットビーム当たりの処理可能 AES 数の関係を求めると表 3 のようになる。なお、処理可能 AES 数 N は $N=[T_{AES}/T_{CH}]$ を用いて算出した(図 9)。

表 3 1 スポットビーム当たりの処理可能 AES 数

伝送速度 (bps)	ADS レポート長 T_{ADS} (秒)	ガードタイム T_G (秒)	処理可能 AES 数 N (機)
600	0.96	0.08	9
1200	0.46	0.08	18
2400	0.21	0.08	34
4800	0.1269	0.08	48
10500	0.0846	0.08	60

を処理することができる。図 10 は北太平洋空域で運輸多目的衛星(MTSAT)の6つのスポットビームを用いたときの処理可能 AES 数を伝送速度に対してプロットしたものである。もちろんチャンネル数を増やせば、処理可能 AES 数は倍加する。

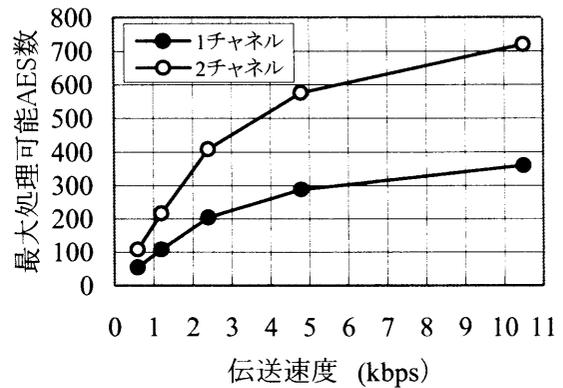


図 10 伝送速度と処理可能 AES 数

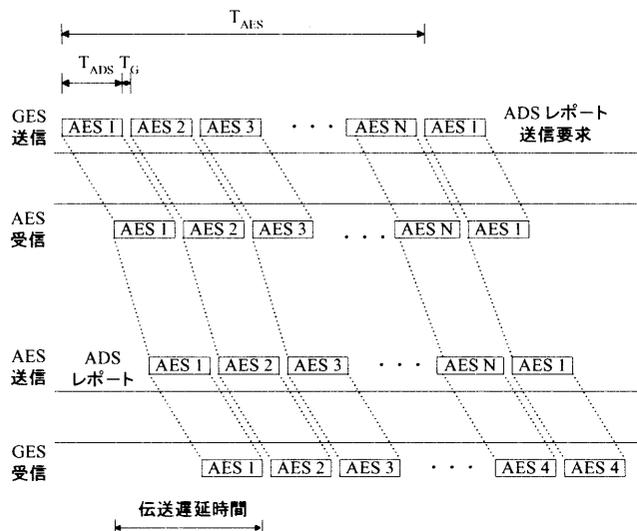


図 9 ポーリング方式伝送のタイムチャート

ただし、 T_{AES} (秒) は AES 当たりの ADS レポート伝送間隔、 T_{CH} (秒) はチャンネル当たりの ADS レポート伝送間隔、 $[]$ はガウス記号を表す。ADS レポート長を T_{ADS} 、ガードタイムを T_G とすると、 $T_{CH}=T_{ADS}+T_G$ と表せる。なお T_G は AES-衛星-GES を電波が往復伝搬する時間の最大値と最小値の差から求めた。また、 T_{AES} はここでは 10 秒である。この結果から、伝送速度 4800bps を用いれば 1 スポットビーム当たり 48 機を処理可能であることがわかる。したがって、MTSAT の北太平洋空域は 6 つのスポットビームの場合を考えると、伝送速度 4800bps で全スポットビームを用いれば 288 機

5.5 回線検討

我が国の MTSAT を例として検討する。この場合、衛星の Lバンド G/T(受信性能指数)はグローバルビームで-9dBK、スポットビームで-2dBK となっている。AES のアンテナを低利得型(利得 0dBi)としてグローバルビームを用いると現在伝送速度 1200bps でデータ伝送が可能である。スポットビームを用いると、電力的に 7dB 大きくなるので、5 倍の伝送速度すなわち 6000bps までデータ伝送が可能と考えられる。したがって、前節で考えた 4800bps での ADS は実現可能と考えられる。もし、AES アンテナとして中利得型(利得 6dBi)を使用できれば、電力的に 13(=7+6)dB 大きくなるので約 20 倍までの伝送速度すなわち 24000bps までのデータ伝送が可能となる。したがって、中利得型を用いれば 10500bps での ADS は実現可能と考えられる。

5.6 伝送遅延時間の検討

図 9 に示したように、AES で GES からの ADS レポート送信要求のための質問信号を受信すると、ADS レポートを作成し、直ちに地上に向けて送信する。この場合の伝送遅延時間は図に示すとおりである。ADS レポートを作成してから、地上で受信するまでの伝送シーケンスは Rチャンネルと同様であるから、ここでは Rチャンネルの伝送をもとにして伝送遅延時間がどのくらいになるか検討する。

図 11 は伝送速度 4800bps のRチャンネルで1SUのデータを伝送したときの予測タイムチャートである。伝送速度 600bps のRチャンネルで 1SU を伝送した場合の実測のタイムチャートでは、伝送遅延時間は約 4.5 秒になる。もし伝送速度を 4800bps にすると、ADS レポート長が約 0.83 秒減少するので、図 11 に示すように伝送遅延時間は 3.7 秒程度になる。さらに、図 11 のタイムチャートでは AES 及び GES とともに 1990 年頃の処理装置 (CPU) を使う場合であり、その後処理速度は大幅に向上している。その点を考慮すれば、AES 及び GES で少なくとも 1 秒程度の短縮は可能と考えられる。したがって、伝送遅延時間としては 3 秒以下とすることは可能と考えられる。また、前述したポーリング方式を用い、かつ再送を行わないことでこの伝送遅延時間は回線の混雑による影響はなく、ほぼ一定に保たれると考えられる。

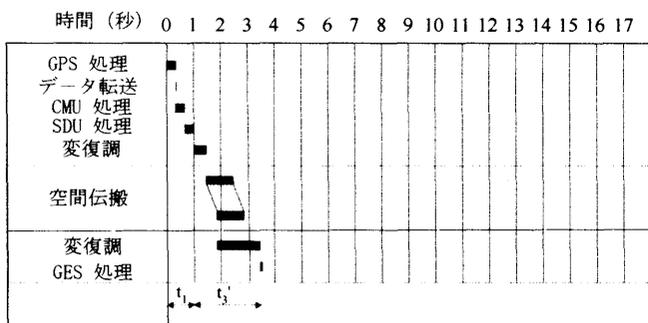


図 11 ポーリング方式の伝送遅延時間予測値

6. まとめ

Tチャンネルの標準プロトコルでは伝送速度 600bps のとき伝送の信頼性は高いが、伝送遅延時間が大

きく、通信回線が輻輳するとチャンネル負荷率の増加とともに指数関数的に増加する。伝送速度を 10500bps にすれば伝送遅延時間はかなり縮小できる。ただし、チャンネル負荷率があまり高くないように通信回線の輻輳をきちんと管理する必要がある。本報告で述べた新たな ADS 伝送プロトコルでは、監視のための専用チャンネルを用い、かつ ADS レポートの内容を基本 ADS ブロックに限定することで SSR に近い時間間隔と伝送遅延時間で航空機の位置を監視することができると考えられる(表 4)。

また、どのようなプロトコルを用いるにしても、伝送速度を大きくすることにより、伝送遅延時間を縮小し、処理容量も向上できる。そこで、今後同じ回線条件で伝送速度を大きくできる新たな変復調方式及び符号化方式についても検討する計画である。

参考文献

- [1] 新美, 石出, 藤田, 湯川, 松崎: “実験用航空管制データ通信システム”, 信学技報, SANE94-37, Aug. 1994.
- [2] 石出, 藤田, 新美, 松崎, 湯川: “自動従属監視 (ADS) 実験システムの開発と実験”, 信学論 (B), Vol. J78-B- II, no. 5, pp. 366-373, May 1995.
- [3] 藤田, 石出, 北折: “航空衛星通信Rチャンネルの伝送遅延特性”, 信学全大, 分冊通信 1, no. B-2-18, pp. 215, Mar. 1998.
- [4] 北折, 石出, 藤田: “空地衛星データ通信の特性”, 信学技報, SANE98-97, Dec. 1998.
- [5] 板野, 藤田, 塩見: “疑似衛星サブネットワークを用いた ATN の通信実験”, 信学技報, SANE2001-33, July 2001.

表4 各方式の比較

	標準プロトコル	ポーリング方式
伝送遅延時間	<ul style="list-style-type: none"> ・ 26秒 (600bps) , 6秒 (10500bps) ・ 通信輻輳により増加 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 3秒 (4800bps) ・ 通信輻輳なし
伝送間隔	<ul style="list-style-type: none"> ・ 8秒の整数倍に設定, コントラクト数に依存 ・ 最小16秒 (1チャンネル1コントラクト) ・ 再送により不均一 ・ 一つのコントラクトでブロック毎に異なる間隔を設定可 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 10秒 ・ 均一
伝送内容	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基本ADSブロック ・ 拡張ブロック 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 基本ADSブロック