

## 15. 航空無線へのCDMA方式の適用可能性

通信・航法・監視領域 ※北折 潤、松久保 裕二  
機上等技術領域 金田 直樹、塩見 格一  
客員研究員 小園 茂

### 1. はじめに

航空用空地通信システムは、航空管制通信や運航管理通信等に広く利用されている。航空機局と地上局が直接交信する対空通信では、洋上空域以外の通信にVHF（Very High Frequency）帯が主に使われる。VHF帯航空通信チャンネルの大部分は振幅変調の音声通信（無線電話）チャンネルであり、それ以外にもACARS（Aircraft Communications Addressing and Reporting System）等のデータ通信チャンネルが割当てられている。しかし、特に欧米では比較的狭い空域内で管制セクタを細かく設定することから、必要となるATCチャンネルが相当数に上る。一方、航空通信用VHF帯チャンネルの割当てが今後追加される可能性はほぼなく、チャンネル数不足は近年の大きな問題になっていた[1]。

チャンネル数不足問題を解決するために各種の次世代通信システムが提案されてきた[2]。しかし今後、通信トラフィック量は通信アプリケーションの高度化に伴い飛躍的に増加すると予測されている。このために近い将来には次世代通信システムの通信容量も限界に達してしまうと考えられる。このため、マルチメディア級通信アプリケーションにも対応可能な、より高速かつ大容量の通信回線の確保が急務となってきた。

本稿では、高速大容量通信システムを実現する技術のうちスペクトル拡散技術を用いたCDMA（Code Division Multiple Access）方式に焦点を当て、CDMA方式の航空用空地通信システムに対する適用可能性について報告する。

### 2. 現在の航空無線

#### 2.1 VHF帯航空通信

VHF帯航空通信の中でも多くのチャンネルを要するのが管制通信である。通常、1つの用途（管制セクタやカンパニーラジオ等）につき1チャンネルを割当てている。VHF帯航空通信では主として無線電話を使用してきた。無線電話はPTT（Push To Talk）による半二重通信であり、ある局の送信時には他の全局が受信するパーティライン方式で運用されている。

また、チャンネル数は少ないもののデータ通信としてACARSまたはVDLモード2が運用されている。これらはCSMA（Carrier Sense Multiple Access）による半二重通信である。

#### 2.2 現行システムの問題点と対策

VHF帯航空通信バンドは世界的に118–137MHzの範囲に定められており、25kHzチャンネル幅で理論上760チャンネルを割当てることができる。現在、欧米においては全760チャンネルのうち3/4以上が既に管制通信用に割当てられている。

チャンネル不足対策として、8.33kHz幅の狭帯域無線電話やVDLモード3といった方式が米国RTCA社やICAO（International Civil Aviation Organization）に提案されてきた[2]。これらの提案方式を一般に次世代航空通信システムと呼ぶ。次世代航空通信システムでは主にチャンネル数の増加および伝送速度の高速化を目指したが、航空通信トラフィックおよび所要チャンネル数は今後の航空輸送需要の増加や高度な通信アプリケーションの導入に伴い、飛躍的に増加するものと予測されている。このために次世代通信システムの完全普及を待たずして、通信システムの許容通信量を超える恐れがある。そこで、各国とも次世代通信システムの性能を遥かに超えた「次々世代」の検討を始めた[3]。日本と諸外国とでは次々世代通信システムに対する要件は異なるが、航空通信システムとしては世界的に統一した規格で普及させる必要がある。次々世代航空通信に対する要件としては、以下のようなものが挙げられる。

- 伝送信頼性の高い回線
- 高速大容量の回線（Mbps オーダ以上）
- 周波数使用効率がよい
- 人的作業量を低減できる
- 通信セキュリティ的に有利

CDMA方式は、周波数使用効率が高く、秘匿性にも優れることから、次々世代航空通信システムに適した方式として有望視されている。しかしながら現行の管制方式との操作互換性を重視した技術的検討は皆無であった。

### 3. CDMA方式の適用可能性

CDMA方式を航空通信システムに導入する場合の制約の1つとして、現在のシステムに対して操作性の大幅な変更ができないことが挙げられる。従来の操作性と大幅に異なるシステムの採用はシステム移行期間のユーザの混乱を招き、危険である。なおここでは音声通信もデータ通信も統一的に扱えるシステムを想定している。以下では、現行の管制方式を前提とした各種の技術的考察を行う。

#### 3.1 拡散方式と遠近問題

CDMAのスペクトル拡散手法には大別してDS(Direct Sequence)方式とFH(Frequency Hopping)方式がある。

DS方式では、目的とするある局からの信号に比べて他局の信号が極めて強く受信されると復号性能が劣化する遠近問題が発生する。遠近問題の解決手段として、一般に移動局側で送信電力制御を行う。しかし送信電力制御は位置関係が自由な移動局間同士には適切な制御とならない。

FH方式では、狭帯域信号が時間によって周波数遷移する。FH方式は原理的には遠近問題が起らないのでDS方式のような送信電力制御は不要となる。FH方式は高速な周波数遷移をするホッピングシンセサイザを作ることが難しいといった制約があるが、移動局間同士の直接通信を想定した場合(3.5節参照)、DS方式よりFH方式の方が適切と考えられる。

#### 3.2 使用周波数帯と覆域

現在対空無線に使用できるバンドのうち、HF(High Frequency)帯以下は長距離伝送が可能だが、広帯域が確保できず高速通信には不適當である。また、各バンドは用途別に細かく分類されており、新規の航空用途への割当ては極めて困難な状況である。このため、現用のVHF帯を使うか、航法装置用のLバンドまたはCバンドを転用するという候補(表1)が有力である[4]。

送信電力40dBm(10W)で受信感度-100dBmと仮定した場合の空間損失-140dBを自由空間伝搬損失とみなして距離換算すると、Lバンドでは約220km(=119NM)、Cバンドでは約50km(=27NM)となる。このため、Cバンドでの通

表1 航空用バンド(VHF以上)

VHF	108—137 MHz	現用
UHF	222—328 MHz	軍用割当多数
Lバンド	960—1215 MHz	DME用
Cバンド	5000—5150 MHz	MLS用

信は基地局周囲約50km程度の範囲に限定する方が良い。一方、VHF帯は電波の見通し距離までが通信可能距離と考えて良い。基地局高0m、移動局(航空機)飛行高度10km(約33000ft)で基地局からの通信距離は約412kmとなる。現行の無線電話と同様の通信範囲であり、エンルート上の航空機との通信はVHF帯を想定するのが現実的である。

なおCDMAを利用する場合、理論上は拡散符号長を長くするほどチャンネル数を増やすことができるため、従来の周波数または時分割多重アクセス方式よりもチャンネル不足に対応することが容易で、システムを柔軟に設計できる。

#### 3.3 ドップラシフト

図1は、移動局が基地局直上を通る水平直線経路を飛行した場合の基地局-移動局間距離対ドップラシフト(VHF帯とCバンド)を表している。図中 $v$ は移動局速度、 $h$ は移動局飛行高度を表す。

数式で表すと、使用周波数 $f$ または移動局の移動速度 $v$ に比例してドップラシフト $f_d$ は大きくなる( $f_d \propto f \cdot v$ )。ドップラシフトは大きいほど同期外れやBERの劣化を招くため、ドップラシフトを小さく抑える方が望ましい。例えば、航空通信での $v$ が携帯電話で仮定する速度の10倍であるならば、 $f$ を1/10にすれば携帯電話と同じドップラシフトとなる。つまり使用周波数が低い方がドップラシフトに対して有利である。

#### 3.4 フェージング

航空無線においては移動局の状態により通信環境が大きく変化する。通信環境は、以下の各状態に分類できる[5]。

- エンルート(通常飛行)状態
- 離着陸状態
- タキシング(空港面移動)状態

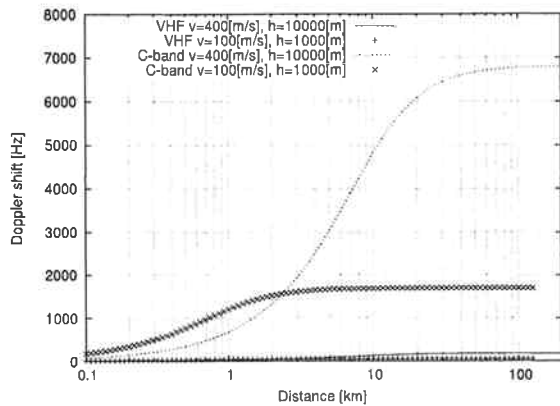


図1 ドップラーシフト

#### ● 駐機状態

エンルート状態では、基地局と移動局が電波の見通し内にある状態と考えられ、発生するフェージングは仲上ライスフェージングと考えて良い。過去、日本における飛行実験では  $K$  ファクタ（直接波対散乱波電力比）は 15dB から 20dB 程度と言う結果が得られている [6, 7]。機体による遮蔽等で直接波が到達しない場合はレイリーフェージングで近似されるが、実際には散乱波は受信点の周囲から非一様に到来する。このため最も強い散乱波を直接波の代わりと見立てておよそ  $K = 2\text{dB}$  程度の仲上ライスフェージングで代用しても差し支えないと考えられる。

離着陸時の移動局は通常、ターミナル管制下にある。空港近辺にあるターミナル管制用基地局との通信では、進行方向か若しくはその逆方向の 180 度の範囲に電波の送受信方向が限定される [5]。またエンルート時に比べて移動速度が遅く、通信距離も短い。一方で飛行中であることからエンルートと同様に直接波を受ける  $K = 15\text{dB}$  程度の仲上ライスフェージングになるものと考えられる。

タキシング時は離着陸時と同様にターミナル管制下にあるが、離着陸時よりも更に移動速度が遅い。また空港周囲の反射物により全方位から電波が到来するものと考えられる。駐機時の移動局はほぼ停止しており、タキシング時と同様に全方位より電波が到来する。全方位からの電波の干渉によって、深いレベルの谷の存在する定在波が発生すると考えられる。

仲上ライスフェージングでは直接波が受信されることから、携帯電話のようなレイリーフェージングに比べて受信レベル変動が少なく、電力制御を行う場合でも比較的緩やかな制御で対応できるものと予想される。

なお、状態によって通信環境が異なることから、環境ごとにフェージングの影響の度合い（通常は最悪値）を考慮してシステム設計に反映させる必要がある。

### 3.5 通信形態と二重化方式

現行の航空通信で保持すべき形態は、以下の通りである。

- 音声通信
  - PTT による半二重通信
  - パーティライン方式
  - 移動局間直接通信
- データ通信
  - 基地局 → 全移動局
  - 基地局 ↔ 1 移動局
  - 1 移動局 → 他の全移動局

これらの中で、データ通信は音声通信の形態でカバーできるため、音声通信の形態について考察する。PTT による半二重通信は操作上の互換性を保持していれば良く、システムとして半二重である必要はない。むしろ、通常の通信はパーティライン形式で運用するが、ある移動局が基地局と交信できない状況下で他の移動局と直接交信するための移動局間通信手段を提供する必要がある、と言う点が重要となる。両者を同時に満足するためには二重化方式について検証する必要がある。

半二重方式は通信の衝突を前提としており、通信トラフィックが多くなるほど遅延や再送処理が増加する。この性質は、特に実時間性を重視する音声通信には適切でなく、また高速伝送を目標とする CDMA 通信システムを実現するためには不利である。なお、半二重方式でも拡散符号を各局固有とすれば同時送信を分離可能であるが、DS 方式では移動局間での任意の電力制御ができないためにパーティラインを構成できない。FH 方式であれば、各局固有符号を与えることによりパーティライン構成は可能である。

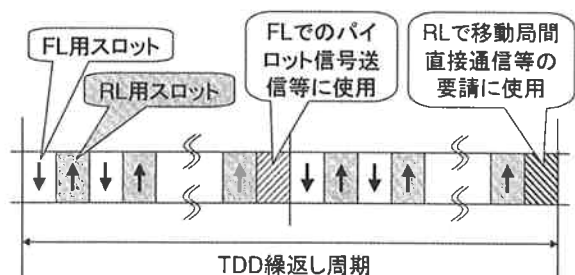


図2 TDD スロット割当て例

全二重方式はFL (Forward Link) とRL (Reverse Link) を別々の通信チャネルで提供する。代表的なものに、FDD (Frequency Division Duplex) と TDD (Time Division Duplex) がある。全二重でパーティラインを形成するためには、例えばRLの音声情報を基地局からFLに乗せて再送信するといった必要がある。つまり基地局→移動局はFLでの同報通信、移動局→他局へはRLと基地局からのFL同報再送信とすれば、基地局の覆域内にある移動局は他局の送信内容を知ることができる。

基地局が通信を中継できないような場合は移動局間直接通信を行う必要がある。このとき一方の移動局からの送信はFLを使用しなければならなくなる。FDDの場合、リンクの役割を逆転させてしまうと、基地局の存在をこれらのリンクから確認することができなくなり、またどの移動局がリンクを逆転するかの調整も困難である。一方、TDDであれば時間スロットの使用効率を低下させるものの特別用途に使用するスロットを用意することで、基地局の存在確認等の役割を持たせることができる(図2)。さらにFDDと比較した場合、TDDには以下のような利点がある。

- FL/RLの回線速度を非対称にできる。
- RF回路が1種類で済む。
- 電力制御が容易。
- ガードバンドが不要。

なお、TDDの前提として各局の時刻同期の問題がある。各局の送信タイミングは、同期用参照クロックの供給方法で大きく2つに分類できる。1つはGPS (Global Positioning System) のような外部システムを利用する方法、もう1つは基地局から参照クロックを送信する方法である。またTDDはガードタイムが必要であり、移動局間通信最大距離1000kmとすれば、ガードタイム

を最低でも3.33ms取る必要がある。ガードタイムによって回線使用効率は低下するが、帯域を増やすかスロット長を長く取ることによってビットレートを確保できるので大きな欠点とはならない。

以上の検討より、二重化方式に関しては全二重におけるTDD方式が有利と考えられる。

#### 4. まとめ

CDMA方式を航空無線システムに適用した場合の各種条件について考察した。現行の管制方式を前提とするならば、

- 使用バンド:VHF帯
- FH方式
- TDDによる全二重

の条件を満たすCDMA方式が航空無線に適切であることが導かれた。本稿の内容はICAO航空通信パネルの作業部会に報告した[8]。

#### 参考文献

- [1] EUROCONTROL. Plan for the 8.33 kHz Channel Spacing Implementation in Europe, Edition 2.0. European Civil Aviation Conference, Dec. 1996.
- [2] ICAO. International Standards and Recommended Practices. Annex 10, Volume III — communication systems, ICAO, 2001.
- [3] M.Schnell, et al. B-VHF — An Overlay System Concept for Future ATC Communications in the VHF Band. In *23rd DASC*, pp. 1.E.2-1-9. IEEE, 2004.
- [4] Brent Phillips, et al. Technology Pre-Screening: Process and Evaluation. ICAO ACP WG-W1/WP-48, Montréal, Canada, Jun. 2005.
- [5] Erik Haas. Aeronautical Channel Modeling. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 51, No. 2, pp. 254-264, Mar. 2002.
- [6] 明山哲, 坂上修二, 吉澤和弘. 900MHz帯における航空移動伝搬特性. 信学論 (B-II), Vol. J73-B-II, No. 8, pp. 383-389, Aug. 1990.
- [7] 北折潤, 津田良雄. VHF帯航空通信におけるフェージング特性. 信学論 (B), Vol. J88-B, No. 6, pp. 1112-1118, June 2005.
- [8] Jun KITAORI. A feasibility study of CDMA technology for ATC. ICAO ACP WG-C10/WP-8, Montréal, Canada, Mar. 2006.