

平成17年度
研究開発成果報告書

高レスポンスマルチホップ
自律無線通信システムの研究開発

委託先： (株)国際電気通信基礎技術研究所

平成18年4月

情報通信研究機構

平成17年度 研究開発成果報告書 (一般型)

「高レスポンスマルチホップ自律無線通信システムの研究開発」

目 次

1	研究開発課題の背景	3
2	研究開発の全体計画	
2-1	研究開発課題の概要	3
2-2	研究開発目標	5
2-2-1	最終目標	5
2-2-2	中間目標	6
2-3	研究開発の年度別計画	7
3	研究開発体制	8
3-1	研究開発実施体制	8
4	研究開発実施状況	
4-1	チャンネル構成技術の研究開発	9
4-1-1	研究開発概要	9
4-1-2	実施状況	9
4-1-3	シミュレーションモデル	9
4-1-4	シミュレーション条件	11
4-1-5	シミュレーションパラメータ	13
4-1-6	評価結果	13
4-1-7	達成状況	16
4-2	チャンネル制御技術の研究開発	16
4-2-1	研究開発概要	16
4-2-2	実施状況	16
4-2-3	逆拡散信号振幅監視方式	16
4-2-4	拡散符号の選択方式	18
4-2-5	評価結果	18
4-2-6	達成状況	20
4-3	中継パケット高速転送技術の研究開発	20
4-3-1	研究開発概要	20
4-3-2	実施状況	20
4-3-3	高速ヘッダ処理によるパケット中継方式	20
4-3-4	パケット多重化による送信オーバーヘッド抑圧技術	29
4-3-5	達成状況	30
4-4	アーキテクチャ・システム化技術の研究開発	31
4-4-1	研究開発概要	31

4-4-2	実施状況	31
4-4-3	交通事故データの解析	31
4-4-4	車車間通信モデルの検討	34
4-4-5	クロスレイヤアーキテクチャの検討	41
4-4-6	達成状況	45
4-5	総括	45
5	参考資料・参考文献	
5-1	研究発表・講演等一覧	46

1 研究開発課題の背景

近年、無線ネットワークの利用が著しく進展し、その利用シーンは多岐にわたり、同時に新たなニーズも急速に拡大している。新たなニーズの中には、ITS（高度道路交通システム）における車両・歩行者等を含めた安全システムである e-Safety や次世代ネットワークゲーム、リアルタイム無線センシング・制御など、マルチホップ無線通信システムを前提として、遅延に対する制約条件の厳しいアプリケーションが出現している。e-Safety において安全運転支援のための車車間通信では、10 ミリ秒周期で周辺車両の位置・速度情報等を交換する必要がある。マルチホップ環境を想定すると、中継ノードでの転送遅延は1 ミリ秒を下回ることが要求される。ネットワークゲームでは同じゲームをする全てのゲーム機間で常に同じ画面を共有するには、16 ミリ秒以内に各ゲーム機からの情報が全てのゲーム機に分配されていなければならない。昨年暮れに発売開始されたゲーム機は見通し距離内の複数端末がゲームをできるものであるが、次世代機ではマルチホップによりさらに範囲を広げる方向性が十分予見される。これらの例からわかるように、新たな利用シーンでは極めて高いレスポンス性能が必要となってくる。

一方、現在利用が進みつつある IEEE802.11 ベースの自律無線通信システム（アドホックモード）の性能実力は、端末がネットワーク参入時にパケット送信までの遅延に数秒を要し、また1 ホップあたりのパケット転送に数ミリ秒を要しているため、上記レスポンス性要求を満たすことはできない。このようなレスポンス性の劣化要因は以下の点にあることがこれまでの研究で明らかとなっている。

IEEE802.11 におけるレスポンス性劣化要因

- (1) **帯域共有による遅延**：各端末が帯域を共有していることにより、電波到達範囲内に同時に送信しようとする端末が増加すると待ち時間が増加する。
- (2) **キャリア検出時の遅延**：送信開始時に他端末のキャリアを検出した場合、ランダムな数のスロット待ちを行う。これにより 802.11 では1~1.7 ミリ秒の遅延が発生する。
- (3) **再送時の遅延**：再送時にはコンテンションウィンドウのサイズを指数的に増加させる方式となっており、場合によっては予測不可能な非常に長い待ち時間を誘発することがある。
- (4) **セル発見・参加時の遅延**：セル同期用ビーコンを通常 100 ミリ秒周期で送信されるが、MAC レイヤでのビーコン中継機能が無いため、マルチホップ環境において端末が移動した場合、セル全体が同調するまで数秒の遅延が生じる場合がある。
- (5) **上位レイヤ処理に伴う遅延**：宛先の書き換え、経路制御などの中継転送処理は物理的な送受信と別の上位レイヤで処理されるため、数ミリ秒の処理遅延が発生している。

これらの要因が複合的に作用して、前述のような遅延が発生している。これらの問題を解決し、高レスポンス化を実現することが求められている。

2 研究開発の全体計画

2-1 研究開発課題の概要

従来の無線 LAN 技術で避けられない主な遅延要因として、(i) 帯域共有による遅延、(ii) キャリア検出時の遅延、(iii) 再送時の遅延、(iv) セル発見・参加時の遅延等が挙げられる。これらの要因を排除し、ア) 待ち時間無しでパケット送受信が可能で、イ) 1 ホップあたりの転送遅延 1 ミリ秒以下の極めて高レスポンスな自律無線通信システムを研究開発

する。そのため、複数周波数・複数拡散符号を組合せたスプレッドアロハ方式によるチャンネル構成技術とチャンネル制御技術，および中継パケット高速転送技術を系統的に統合する新しい技術を研究開発する。本研究開発は以下のサブテーマに沿って進める。

- (1) チャンネル構成技術
- (2) チャンネル制御技術
- (3) 中継パケット高速転送技術
- (4) アーキテクチャとシステム化技術

2-1-1 チャンネル構成技術の研究開発

位置付け：

パケット送信時における遅延の低減化は高レスポンス化において必須であり，その実現を可能とするチャンネル構成を研究開発するものである。

研究方針：

高レスポンス化を図るため，端末においてパケット送受信が同時に行える方式，かつパケット衝突時もパケット再生が可能なアクセス方式に基づき，遅延の低減化が可能となるチャンネル構成技術を研究開発する。

研究手法：

高レスポンス化に対して効果的なチャンネル構成技術として複数周波数と複数拡散符号を用いたスプレッドアロハ方式(MC)²-SAを開発し，解析，シミュレーション等により評価した上で試作，評価，実装を行う。

2-1-2 チャンネル制御技術の研究開発

位置付け：

チャンネルの使用条件の設定と送信制御が適切に行われなければ，高レスポンスを実現した上で信頼性の高い通信を実現することはできない。これらの機能はチャンネル制御技術として実現する必要がある。高レスポンス性を最優先としたチャンネル制御技術は，前述のサブテーマの要素技術（チャンネル構成技術）を適切に利用するための必須技術である。

研究方針：

高レスポンス性を要求する通信の利用シーンを明らかにした上で前提条件を明確化し，高レスポンス化を図りつつ信頼性が確保可能なチャンネル制御技術を研究開発する。

研究手法：

端末の参入・退去や移動に対応可能な方式を検討し，解析やシミュレーションによる機能，性能の評価を行い，試作，評価，実装を行う。

2-1-3 高速パケット中継転送技術の研究開発

位置付け：

上記のチャンネル構成・制御技術で送受信における待ち時間が排除された場合でも，中継パケットの転送処理に時間を要すると，システムとしての低遅延化は実現できない。如何に中継パケット転送処理を高速化するかはチャンネル構成・制御技術と並んで高レスポンス化の重要な要素技術である。

研究方針：

パケット受信時に転送処理が必要であるか、当該端末で終端するかを短時間で判断する技術、及びその判断後に中継パケットを遅滞なく転送処理する技術を開発する。

研究手法：

中継パケットの識別を低レイヤで実現するためのフレーム構成と識別子の定義，これに関連するルーティング情報との連携手法，さらにハードウェア処理に向けた手法を開発する．方式検討，シミュレーションにより機能，性能評価を行い，試作，評価，実装を行う．

2-1-4 アーキテクチャとシステム化技術の研究開発

位置付け：

高レスポンス性要求に対して効果的な要素技術をシステムとして構成し，性能を十分引き出すためのアーキテクチャが必要である．本サブテーマは本研究開発の全体構成を定める基盤的な位置付けである．また本サブテーマにて統合的なシステム実証を行う．

研究方針：

チャンネル構成技術，チャンネル制御技術，中継パケット高速転送技術の各要素の機能配分を適切に設定し，また，各要素間の相互依存性に基づくクロスレイヤアーキテクチャを採用してシステムの最適化を図る．

研究手法：

ATR ではこれまでに電波の受信信号強度(RSSI)に基づいたルーティング方式や，低レイヤ回線状態に基づいたTCPにおけるQoS制御など，クロスレイヤ処理によるネットワーク制御技術を開発してきた．これらの実績をベースに，他のサブテーマの研究開発要素を有機的に結合し，高レスポンス性を最大限に引き出すためのアーキテクチャを確立する．その上で，製品化の実現性を踏まえ，各要素技術を統合的に実装しシステム化する技術を確立する．

2-2 研究開発目標

2-2-1 最終目標（平成22年3月末）

以下の各サブテーマの研究開発成果により，端末がネットワークを自律的に構成する無線ネットワークにおいて，ア）待ち時間無しでパケットの送信と受信が可能で，イ）1ホップにおける転送遅延を1ミリ秒以下に抑える高レスポンス自律無線通信システムを実現する．

2-2-1-1 チャンネル構成技術の研究開発

複数周波数，複数拡散符号を組合せて用いる(MC)²-SA送受信技術に関してハードウェア実装により実現する．

2-2-1-2 チャンネル制御技術の研究開発

- (1) 各周波数チャンネルにおける干渉量(MAI)監視技術を確立し，ハードウェア及びファームウェアとして実装する．
- (2) 受信信号品質を検出する技術を確立し，ハードウェア及びファームウェアとして実装する．
- (3) 上記(1)(2)を用いて最適なチャンネル選択を実行する技術を確立し，ハードウェア及

びファームウェアとして実装する。

2-2-1-3 中継パケット高速転送技術の研究開発

- (1) 中継パケット識別処理方式を確立し，識別されたパケット種類に応じた転送制御を高速に実行する技術を確立し，ハードウェア及びファームウェアとして実装する。
- (2) 上記(1)の転送制御に応じてカットスルー転送を実行するハードウェア及びファームウェアを実装し実現する。

2-2-1-4 アーキテクチャとシステム化技術の研究開発

- (1) チャンネル構成技術，チャンネル制御技術，中継パケット高速転送技術の各機能の動作において必要な制御情報，状態通知情報インタフェースを，レイヤにまたがって体系的に規定するアーキテクチャを確立する。
- (2) チャンネル構成技術，チャンネル制御技術，中継パケット高速転送技術として実現される機能をシステムとして統合，実装し，小型基盤モジュールとして実現する。
- (3) ITS 車車間通信や次世代ネットワークゲーム機への適用性を実証する。

2-2-2 中間目標（平成20年1月末）

端末がネットワークを自律的に構成する無線ネットワークにおいて，ア) 待ち時間無しでパケットの送信と受信が可能で，イ) 1ホップにおける転送遅延を1ミリ秒以下に抑える高レスポンス自律無線通信システムを実現するための機能的，性能的な見通しを得る。

2-2-2-1 チャンネル構成技術の研究開発

トラフィックモデルを確立した上でそれに応じた周波数と拡散符号方式の数などのパラメータについて解析，シミュレーションにより決定し，ハードウェアの部分試作，評価により基本設計を終える。

2-2-2-2 チャンネル制御技術の研究開発

- (1) 広帯域干渉量(MAI)監視の基本方式についてハードウェア及びファームウェアの部分試作，評価により基本設計を終える。
- (2) 受信信号品質の検出とその評価に関する基本方式についてハードウェア及びファームウェアの部分試作，評価により基本設計を終える。

2-2-2-3 中継パケット高速転送技術の研究開発

- (1) ラベルスイッチ機能の方式設計，試作，評価を終える。
- (2) 処理遅延の低減について最適化を図った中継パケット識別アルゴリズムを開発する。
- (3) 中継パケット識別結果に応じた制御アルゴリズムを開発する。
- (4) カットスルー転送ハードウェアの試作，評価によって基本設計を終える。

2-2-2-4 アーキテクチャとシステム化技術の研究開発

- (1) チャンネル構成技術，チャンネル制御技術，中継パケット高速転送技術の各機能の動作において必要な制御情報，状態通知情報を抽出し，レスポンスを低下させることなくレイヤ間でこれらの情報を授受するアーキテクチャについて，機能・性能を満足する見通しを得る。
- (2) チャンネル構成技術，チャンネル制御技術，中継パケット高速転送技術をシステムとして統合するための基本設計を終える。

2-3 研究開発の年度別計画

(金額は非公表)

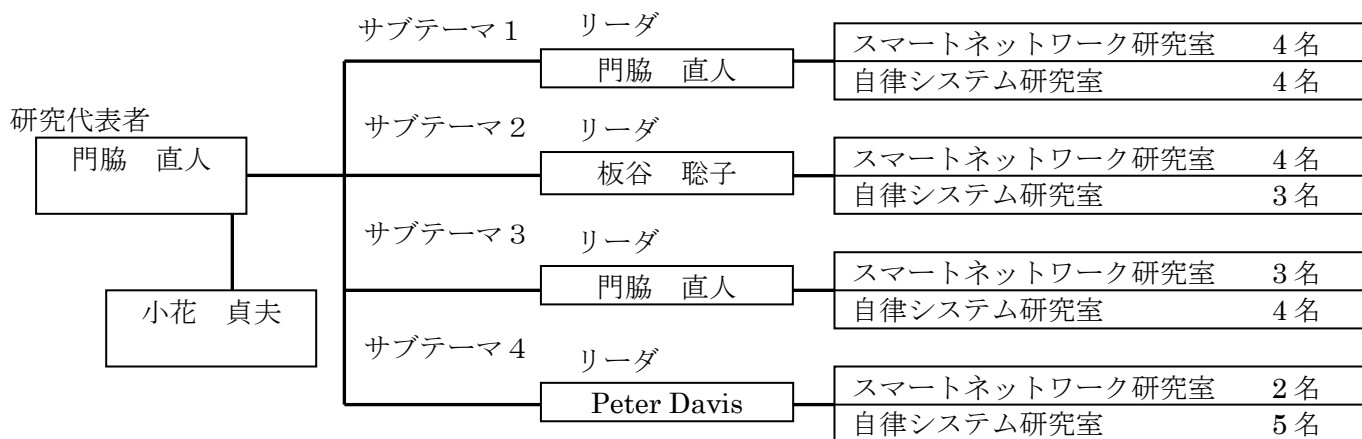
研究開発項目	17年度	18年度	19年度	20年度	21年度	計	備考
「高レスポンスマルチホップ自律無線通信システムの研究開発」			中間評価				複数のサブテーマを担当する者がいるため、()内はのべ人数である。
ア「チャンネル構成技術の研究開発」)	
イ「チャンネル制御技術の研究開発」							
ウ「中継パケット高速転送技術の研究開発」							
エ「アーキテクチャとシステム技術の研究開発」							
間接経費額 (税込み)							
合計							

単位：百万円

- 注) 1 経費は研究開発項目毎に消費税を含めた額で計上。また、間接経費は直接経費の30%を上限として計上(消費税を含む)。
 2 備考欄に再委託先機関名を記載
 3 年度の欄は研究開発期間の当初年度から記載。

3 研究開発体制

3-1 研究開発実施体制



4 研究開発実施状況

4-1 チャンネル構成技術の研究開発

4-1-1 研究開発概要

パケット送信時における遅延の低減化は高レスポンス化において必須であり、その実現を可能とするチャンネル構成技術を研究開発する。本研究開発では、複数の周波数と複数の拡散符号を組合せて用いるスプレッドアロハ方式 (MC)²-SA : Multi-Carrier & Multi-Code Spread ALOHA によるチャンネル構成技術を新規に開発する。

今年度は、次年度に行う予定である変復調装置の詳細設計を行うための基礎となる概念設計を実施。具体的には、トラフィックモデルの確立、(MC)²-SA 方式設計とそれに基づく基本的な通信特性の評価を、主に解析およびシミュレーションにより実施した。

4-1-2 実施状況

チャンネル構成技術の要素技術である (MC)²-SA に関して、車車間通信を対象としたシミュレーションモデルに基づいたシミュレーションを行った。目標とする通信性能（車両台数 120 台で PER=1E-5）を設定し、これを満足するためのパラメータと必要帯域幅について検討、評価を行った。なお、シミュレーションではチャンネル制御技術の一部も実装した。

4-1-3 シミュレーションモデル

今年度のシミュレーションモデルでは、複数存在する車両間において、同一周波数帯での符号多元接続に基づくパケットの送受信を想定した。以下に、特性評価のために使用したモデルの詳細を示す。

(1) パケット送受信タイミング

各車両では、固定長のパケットを一定周期で送信する。また、車両間のパケット送信タイミングは非同期である。図 4-1-1 に、3 台の車両が送信周期 T_p [sec] 毎にパケットを送信している例を示す。また、パケットの送信開始時刻 ($t_1 / t_2 / t_3$) は非同期送信のため、各車両で異なっている。なお、パケットの送信開始時間はシンボル単位で異なるものとし、また、チップ単位では車両間で同期が取れている場合を想定する。

送信パケットに用いる拡散符号の選択は、チャンネル制御技術の一部であるが本シミュレーションにおいて以下の手法を用いている。

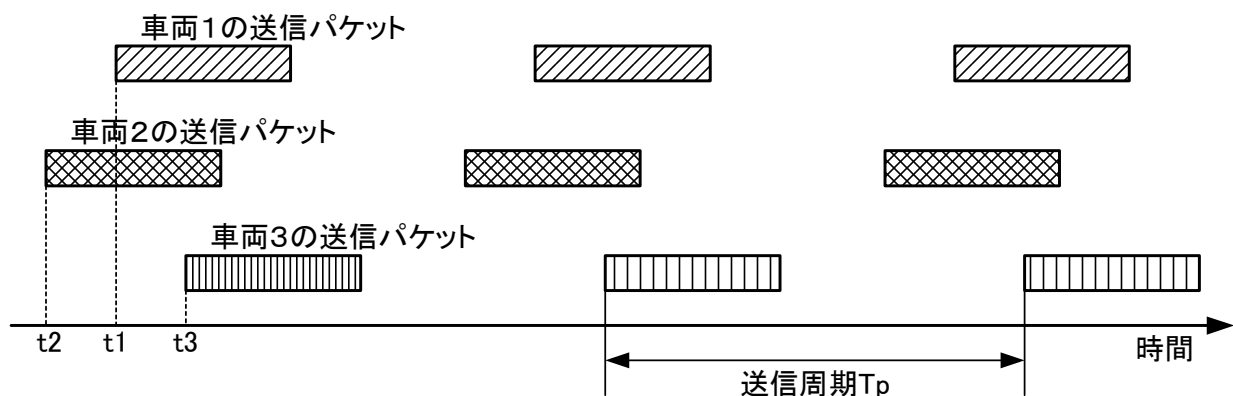


図 4-1-1 パケット送信の様子（車両 3 台の場合の一例）

図 4-1-2 に示すように、パケット a の送信される直前の N_c シンボル時間分、チャンネル監視を行う。チャンネル監視手法については第 4-2 項に記す。パケット a はパケット b と時間的に重なっているため、監視時間内に、パケット b から受ける干渉が少なくなるように拡

散符号を求める。そしてその求めた符号をパケット a で使用する拡散符号とする。

今回は全二重通信方式を前提とした。即ち、ある車両は自車両発の packets を送信しつつ、他車両からの packets を受信することができる。ここで、自車両が packets を送信しているときに他車両から packets を受信した場合、信号の回り込みが発生する。

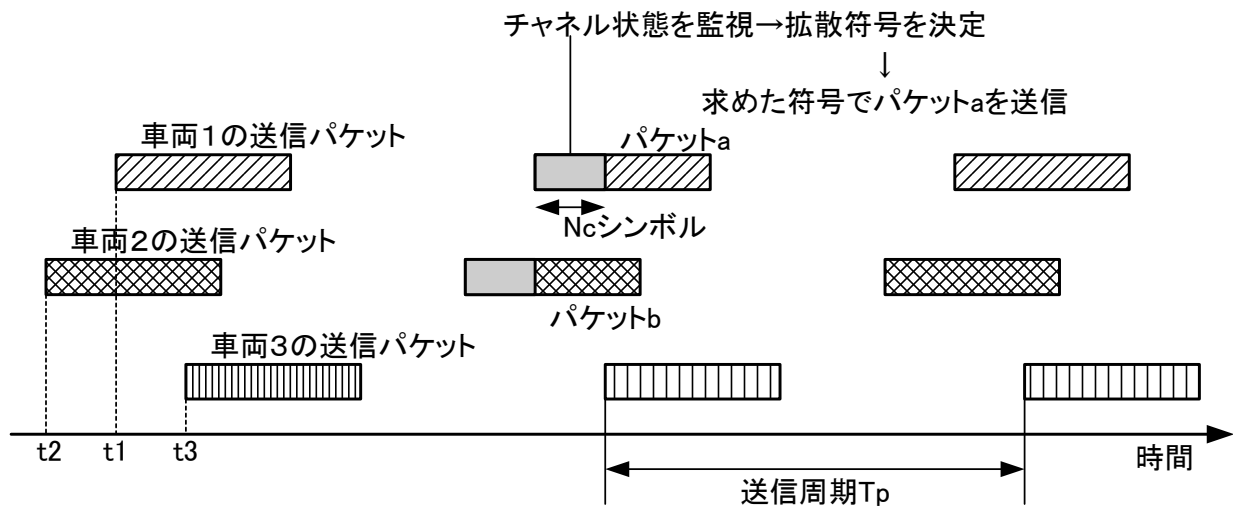


図 4-1-2 チャンネル制御を用いたパケット送信の様子

(2) 無線信号送受信モデル

送信車両におけるパケットデータの発生から、受信車両での受信パケットのデータ復調が行われるまでの流れを、図 4-1-3 に示す。

送信車両では、規定の長さ（固定長）のパケットデータをランダムに発生させる。発生したデータを、 $\pi/4$ シフト QPSK 変調器により複素信号に変換する。その後、後述のチャンネル監視手法により選ばれた拡散符号（Gold 系列）を、複素信号の実部及び虚部のそれぞれに対して乗算し、拡散処理を行う。拡散処理が施された信号は無指向性アンテナから送信される。

伝搬路では、まず雑音として加法性白色ガウス雑音 (AWGN) を想定する。雑音電力 σ^2 [dB] は、ノイズフィギュア NF [dB] から求められ、

$$\sigma^2 = NF + 10 \log_{10}(KT_0B)$$

となる。ここで、 K はボルツマン定数、 T_0 [K] は温度、 B [Hz] は空中での使用周波数帯域幅である。また、一般的に電波伝搬により信号電力は減衰するが、今年度は、各車両の送信パケット信号は D_i [dB] だけ一様に減衰するものとした。さらに、自車両の回りこみ成分は D_o [dB] だけ減衰することとした。

受信車両では、所望パケット信号のほかに、干渉パケット信号及び受信車両自らが送信しているパケット信号の回りこみ成分が重畳された信号を受信する。そこでまず受信信号に対して、所望パケットで使用されている拡散符号を、実部及び虚部のそれぞれに対して乗算し、1 シンボル分たし合わせるにより複素受信値を求める（逆拡散処理）。その後、 $\pi/4$ シフト QPSK 復調器により復調が行われ、軟判定値が求められる。この値に対して硬判定を行い受信データを抽出する。

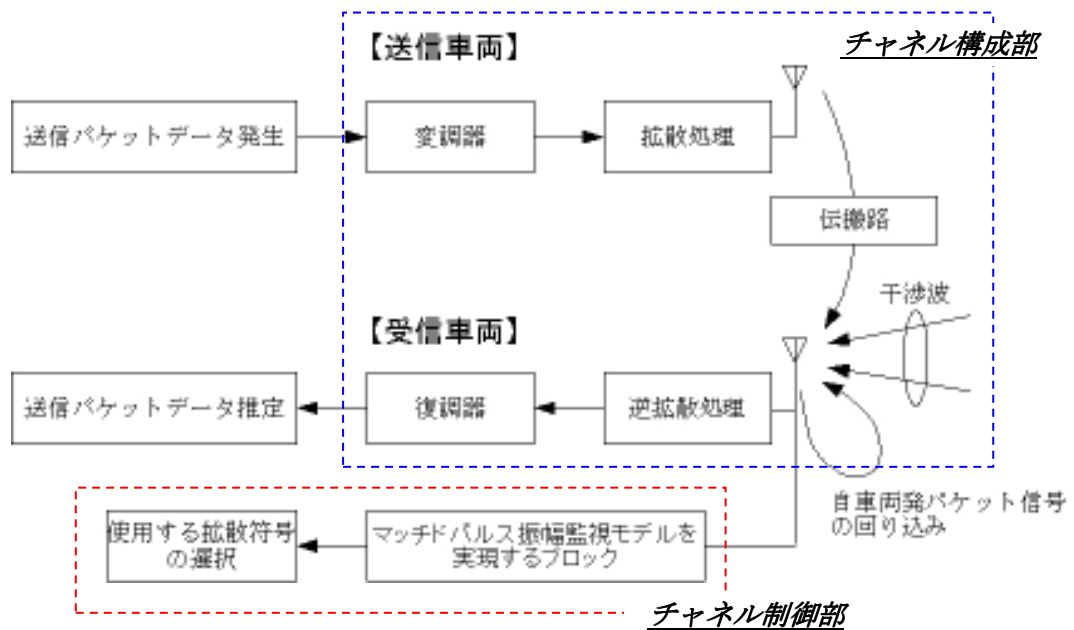


図 4-1-3 無線信号送受信モデル

4-1-4 シミュレーション条件

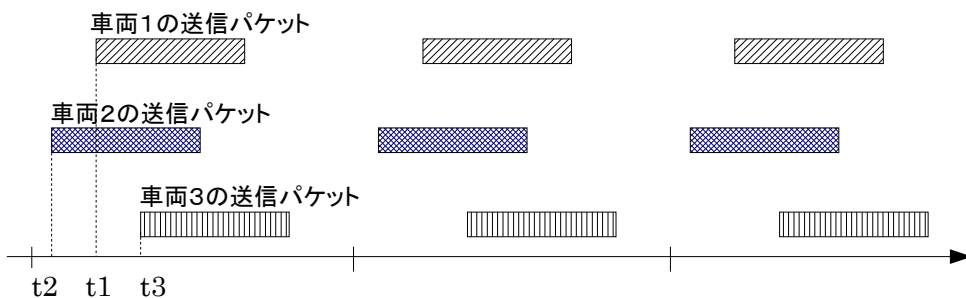
シミュレーションの実行モデル及びパラメータの設定値を示す。

本研究では、符号拡散されたパケットの通信特性を明らかにする必要がある。この場合、チャンネル内の干渉量が通信品質に大きく影響する。所望パケットに与えられる干渉の量は、干渉源となるパケットと所望パケットがどれだけ時間的に重複するかによって大きく変化する。図 4-1-1 及び図 4-1-2 より、このパケット同士の時間的重複は、送信開始時刻により大きく左右されることがわかる。そこでシミュレーションでは、規定 (N_p) 個のパケットの重複パターンを与えて性能評価を行った (図 4-1-4 参照)。

本シミュレーションでは、各車両から発するベースバンド信号をパケット毎に実際に生成し、拡散・逆拡散の処理や雑音付加の操作を行っている。

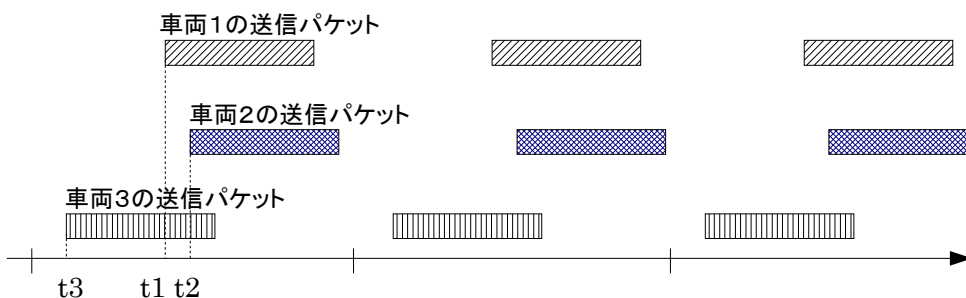
シミュレーション条件を表 4-1-1 に示す。拡散符号としては Gold 符号を使用した。周波数が異なる信号は干渉とならないものとし、ここでは一つの周波数チャンネルのみでシミュレーションを実行した。通信方式に関しては、ITS の分野において使用されている ARIB STD-T75 をベースとした。具体的なシミュレーション条件として、周波数帯は 5.8GHz 帯、情報伝送速度は 4096kbps を前提とした。また、5.8GHz 帯における一般的な受信増幅器の雑音指数 (NF) は約 7dB であり、固定劣化を 3dB とし総合 NF を 10dB とした。

【シミュレーション1回目】



↓ 重複パターンを変更

【シミュレーション2回目】



↓ 重複パターンを変更

(規定数繰り返す)

図 4-1-4 シミュレーションの流れ

表 4-1-1 シミュレーション条件

項目	前提とする仕様	備考
周波数帯	5.8GHz 帯	
情報伝送速度	4096[Kbps]	
変復調方式	$\pi/4$ -QPSK (遅延検波)	
周波数チャンネル数	1	
アンテナ指向性	無指向性	
アンテナ利得	0dBi	
チャンネル当りの端末数	1	基本は 1 端末。多数の場合はチャンネル当り複数端末も可
パケット衝突時の処理	特に無し	符号多元接続により許容
拡散符号	Gold 符号	生成多項式は表 4-1-4 参照
通信路雑音	AWGN	
ノイズフィギュア NF	10[dB]	
温度 T_0	300[K]	

4-1-5 シミュレーションパラメータ

シミュレーションで用いたパラメータの値を表 4-1-2 に示す。また、拡散率と拡散符号を選択する割合にを可変パラメータとした。今年度は、自車両の回りこみ成分は存在しないように、信号電力減衰量（自車両回り込み） D_o を 100000[dB]としている。なお本パラメータから計算される CNR(Carrier to Noise power Ratio)は 143.83[dB]となり、非常に大きな値をとっていることがわかる。つまり、雑音の影響は非常に小さく、特性劣化要因は干渉のみであるといえる。

表 4-1-2 シミュレーションパラメータ値一覧

パラメータ名称	値
最大車両台数	150[台]
シミュレーションの試行回数 N_p	300
パケットのペイロード長	200[byte]
パケットのヘッダ長	0[byte]
パケット送信周期 T_p	0.1[sec]
送信電力	10[dBm/MHz]
信号電力減衰量（他車両発） D_I	0[dB]
信号電力減衰量（自車両回り込み） D_o	100000[dB]
拡散率	7、31、63、127
チャンネル監視を行うシンボル数 N_c	5
拡散符号を選択する割合 P_N	30、100 [%]

4-1-6 評価結果

(1) パケット誤り率特性(PER)

車両台数に対する PER 特性を図 4-1-9 に示す。この特性は、取り得る拡散符号全てに対する選択対象符号の割合 P_N を 100 [%]にした場合である。パケット送信に際してはチャンネル監視に基づいて干渉量の少ない拡散符号を選択するが、 $P_N = 100 [%]$ 、つまり取り得る全ての拡散符号を対象にランダムに選んでいる。また、拡散率については、7、31、63、127 の 4 つの場合について特性を示す。

図 4-1-9 より、拡散率が小さい程特性が悪くなることがわかる。使用可能な符号チャンネル数は、拡散率が小さい程少なくなることから、車両台数が多くなると拡散符号の複数車両間での同時使用がしばしば発生する。ひとつの拡散符号が複数の車両間で共有されると、受信信号からそれぞれのパケットを識別できないため復調に失敗し、パケットの伝送誤りとなる。このように拡散符号の重複は拡散率が小さいほどよく発生するため、拡散率が小さくなると特性が悪くなる。

また、車両台数が増えるに従って PER 特性は劣化する。これは、車両台数が増えると、同じ拡散率でも拡散符号の重複使用が発生しやすいこと、また相互相関特性が 0 ではないため、車両台数が増えるにしたがって干渉源となるパケットの数が増え干渉の影響が大きくなる、という 2 つの理由が考えられる。

なお、拡散符号をランダムに選ぶ $P_N = 100 [%]$ の場合、 $PER = 10^{-5}$ を達成することは困難であることがわかった。

次に、 P_N を 30 [%]にした場合の、車両台数に対する PER 特性を図 4-1-10 に示す。この場合、チャンネルの干渉量を監視し、全拡散符号のうち干渉の少ない拡散符号の 30%を対象として選択・使用しているため、全拡散符号をランダムに選択する図 4-1-9 に比べて特性

は改善されている。また、その改善量は、拡散率が大きくなるに従って増加している。拡散率が 127 のような大きい場合、非常に大きな効果が得られ PER=10⁻⁵を達成した。拡散率が低い場合、車両台数の小さい場合でも PER=10⁻⁵を達成することはできなかった。これは干渉量の少ない符号チャネルをランダムに選択する際に、同一の拡散符号を複数車両が同時に使用してしまう場合が発生することに起因する。

(2) 必要帯域幅 vs. 車両台数特性

図 4-1-10 より、PER=10⁻⁵を達成する条件は、拡散率 127 かつ車両台数が 35 台以下の場合である。このときの必要な帯域幅は、伝送速度が 4096[Kbps]であり、1 シンボル当たり 2 ビット伝送可能であることを考慮すると、約 260[MHz]となる。

(3) トレードオフ

表 4-1-3 に本システムにおける 1 周波数あたりの必要帯域幅を示す。case1 は、前述のシミュレーション結果である。5.8GHz 帯の周波数で帯域 260MHz のハードウェア設計は非常に困難である。そこで、より現実的なパラメータ設定に関する検討を行った。case2 では、情報伝送速度を case1 の 1/4 にすることにより、帯域を 1/4 にすることが可能である。また、case3 では、伝送速度を case1 の 1/2、拡散率を 1/2 にすることで、帯域を 1/4 にすることが可能である。しかし、PER 特性は case1 から 1 桁劣化する。case4 では、伝送速度を case1 の 1/4、拡散率を 1/2 にすることで、帯域幅を 1/8 にすることが可能なことがわかる。しかし、PER は case3 と同様に劣化する。このように、帯域幅、伝送速度、拡散率、及び PER はトレードオフの関係にあることがわかった。より現実的なパラメータを設定するにあたっては、アプリケーション要求を検討した上で判断することが必要である。

表 4-1-3 必要帯域幅

	case1	case2	case3	case4
帯域幅[MHz]	260	65	65	30
周波数[GHz]	5.8	5.8	5.8	5.8
情報伝送速度[kbps]	4096	1024	2048	1024
拡散率	127	127	63	63
PER	10e-5	10e-5	10e-4	10e-4

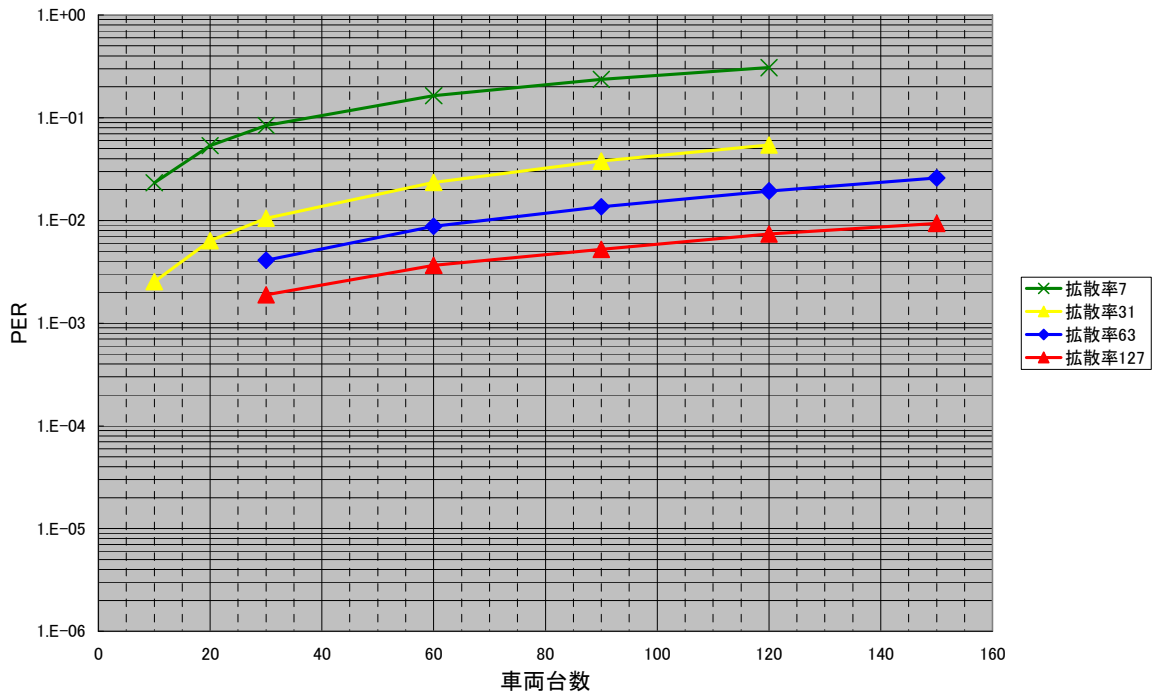


図 4-1-9 車両台数に対する PER 特性 ($P_N = 100\%$)

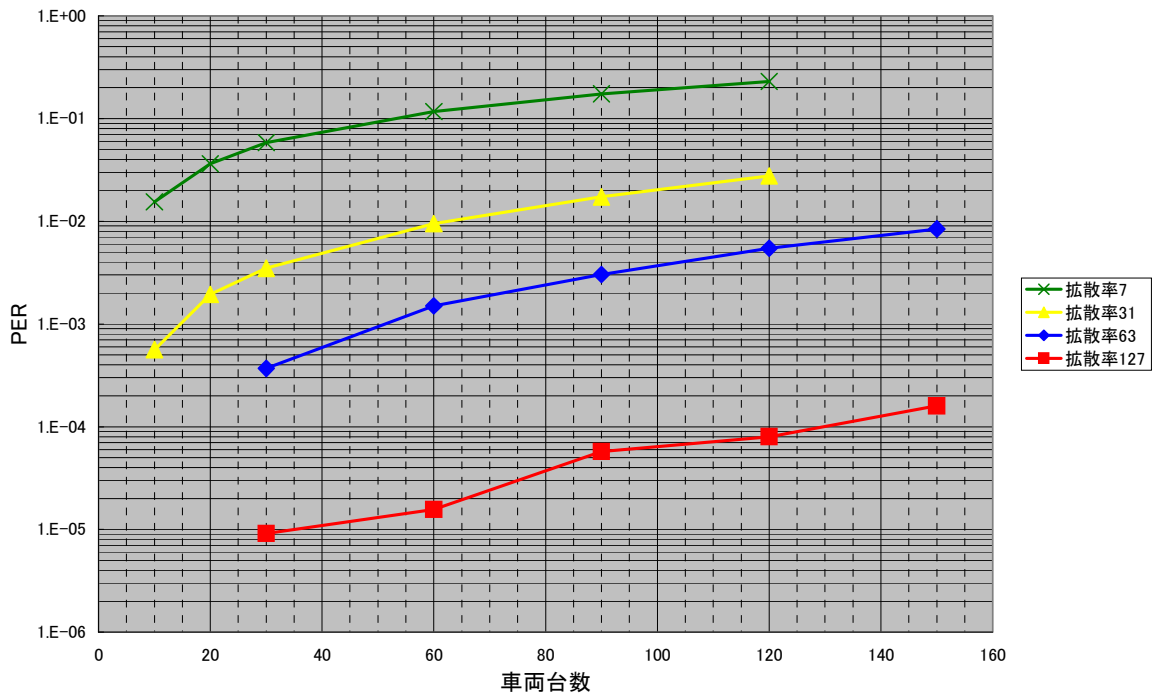


図 4-1-10 車両台数に対する PER 特性 ($P_N = 30\%$)

4-1-7 達成状況

今年度は変復調装置の詳細設計を行うための基礎となる概念設計を実施した。

トラフィックモデルに関しては、全体システム設計に関わることから、今年度はサブテーマ「アーキテクチャとシステム化技術」で車車間通信の通信モデル検討として実施した。(4-4 項参照)

(MC)²-SA 方式検討として、シミュレーションにより符号化率と車車間通信における車両台数をパラメータとして、干渉量の PER 特性への影響、必要帯域幅の検討を行った。シミュレーションでは、サブテーマ「チャンネル制御技術」に含まれるチャンネルの干渉量監視手法と符号選択手法も取り入れた。車車間通信への適用が検討されている 5.8GHz 帯においては、情報伝送速度 4Mbps で PER 10^{-5} を満足するためには帯域幅 260MHz となり、ハードウェア設計及び割当周波数の見地から現実的ではない。帯域幅、周波数帯、伝送速度、拡散率、PER はトレードオフの関係にあり、帯域幅を狭くするためには、情報伝送速度と拡散率を抑えることが考えられるが、PER が劣化する可能性もある。今後はアプリケーション要求を明確にしたうえでこれらパラメータ設定し性能と実現性を検証する必要がある。また、今年度は、シミュレーションにおいて遠近問題のない状態を前提としたが、より実際的な評価とシステム設計を行うため、今後は遠近問題について検討する予定である。

以上のように、今年度計画に対して、100%実施した。この成果を基に次年度の検討課題が明確になった。

4-2 チャンネル制御技術の研究開発

4-2-1 研究開発概要

(MC)²-SA は複数の周波数を利用するため、送受信において適切な周波数を効率良く選択する制御機能が必要である。特に拡散信号が重畳するため、複数端末の送信信号が原因となる干渉量(MAI)を監視し、MAI の少ないチャンネルを選択することにより通信品質を維持すると同時に、送信時の待ち時間を排除する。

今年度は、次年度に実施予定であるチャンネル制御装置の詳細設計を実施するための基礎となる概念設計を実施した。具体的には、MAI 監視手法の方式設計とその性能評価を、主に解析およびシミュレーションにより実施した。

4-2-2 実施状況

今年度は、MAI 監視手法として逆拡散信号振幅監視方式を考案し、その実現手法と特性評価を行った。

4-2-3 逆拡散信号振幅監視方式

各車両では、パケットを送信する直前に、 N_c シンボル分の時間にわたってチャンネルを監視し、送信パケットで使用する拡散符号を決定する。図 4-2-1 にその流れを示す。

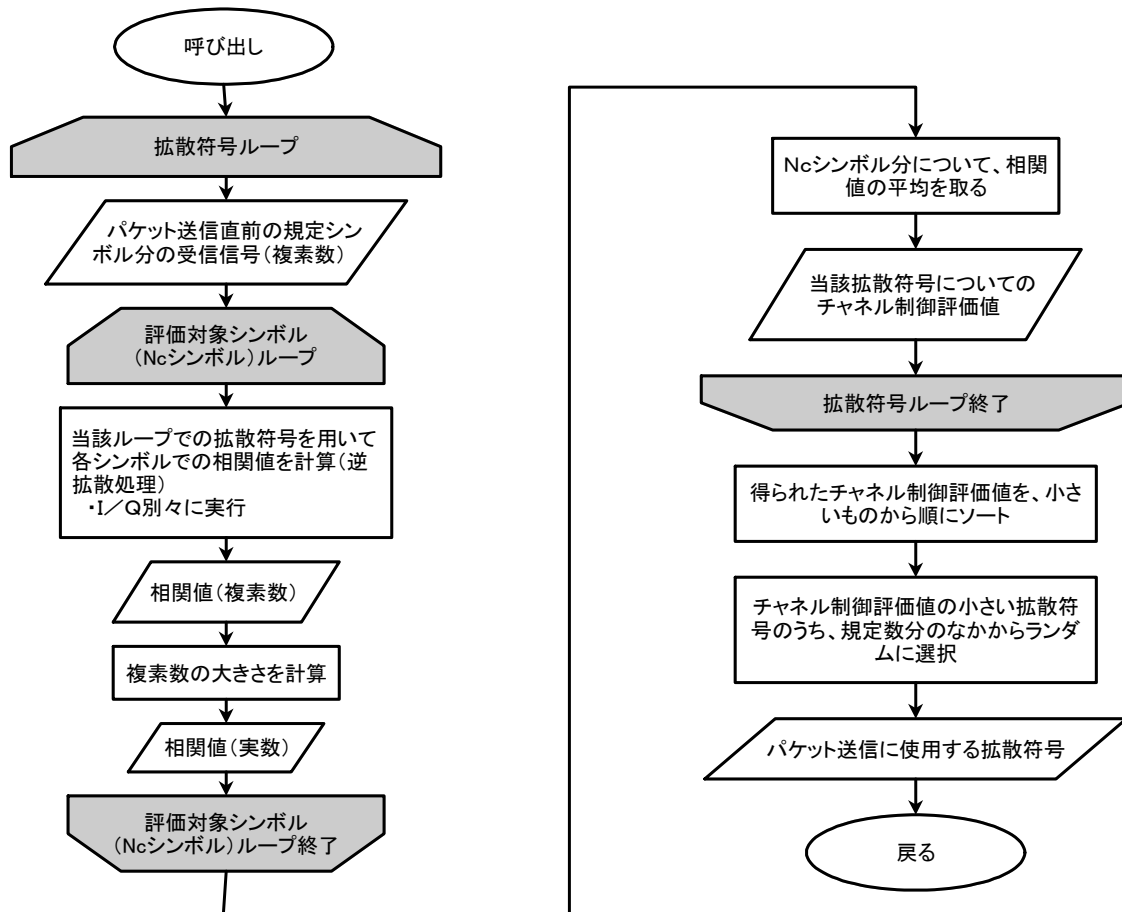


図 4-2-1 チャネル制御処理の流れ

本方式は、 N_c シンボル分の時間にわたってチャネルを監視し、取りうる全ての拡散符号 $k = \{0, \dots, (\text{拡散率})\}$ について、それぞれの符号が他車両で使用されているかどうかの判断、及び干渉量の推定を行う。これは、拡散符号 k を用いた複素受信信号の逆拡散処理により得られる値（複素値）の絶対値を、 N_c シンボルにわたって平均化した値 $\bar{\xi}_k$ によって行われる。

判断指標 $\bar{\xi}_k$ を導出する。まず、 $s = \{0, \dots, N_c - 1\}$ 番目のシンボルにおいて、受信信号の実数成分及び虚数成分を、拡散符号 k により逆拡散して得られる値 $\xi_{k,s}^I$ 及び $\xi_{k,s}^Q$ は以下のように表すことができる。

$$\xi_{k,s}^I = (\text{変調成分})^I + (\text{干渉成分})^I + (\text{雑音成分})^I \quad (1)$$

$$\xi_{k,s}^Q = (\text{変調成分})^Q + (\text{干渉成分})^Q + (\text{雑音成分})^Q \quad (2)$$

なお、 I 及び Q はそれぞれ実数成分と虚数成分をあらわす。これらを用いると、逆拡散処理出力の大きさ $\xi_{k,s}$ は、

$$\xi_{k,s} = \left| \xi_{k,s}^I + j \xi_{k,s}^Q \right| \quad (3)$$

となる。

よって、以下の式が求められる。

$$\bar{\xi}_k = \frac{1}{N_c} \sum_{s=0}^{N_c-1} \xi_{k,s} \quad (4)$$

拡散符号 k が受信中の他パケットで使用されている場合を考える。干渉成分や雑音成分が存在しないと、 $\xi_{k,s}^I$ 及び $\xi_{k,s}^Q$ の大きさをとると複素値の変調成分の大きさをとることにな

る。変調成分は逆拡散過程で正規化されるため、この場合 $\xi_{k,s} = 1$ が得られる。また、干渉成分や雑音成分が存在するとこの値 1 より大きな範囲に分布することが予想されるが、 N_c シンボルにわたって平均を取ることで、シンボル間で値が変動しやすい雑音成分の影響を減少させている。

逆に、拡散符号 k が受信中の他パケットで使用されていない場合、干渉成分と雑音成分の大きさが $\bar{\xi}_k$ に現れる。当該拡散符号での干渉の影響が大きいと干渉成分の値が増加し、 $\bar{\xi}_k$ の値も必然的に大きくなる。以上より、 $\bar{\xi}_k$ の値が大きいほど拡散符号 k の使用されている可能性は高く、その符号を使用した場合、干渉の影響を大きく受けるといえる。

図 4-2-2 に、評価値 $\bar{\xi}_k$ を計算する機能ブロックを示す。ここではひとつの拡散符号に対して、式(1)及び式(2)の値を計算する逆拡散処理、式(3)の複素数の絶対値を計算するブロック、そして式(4)の平均化の処理を行うブロックの3つが設けられる。これらのブロックは、拡散符号の数だけ用意される。

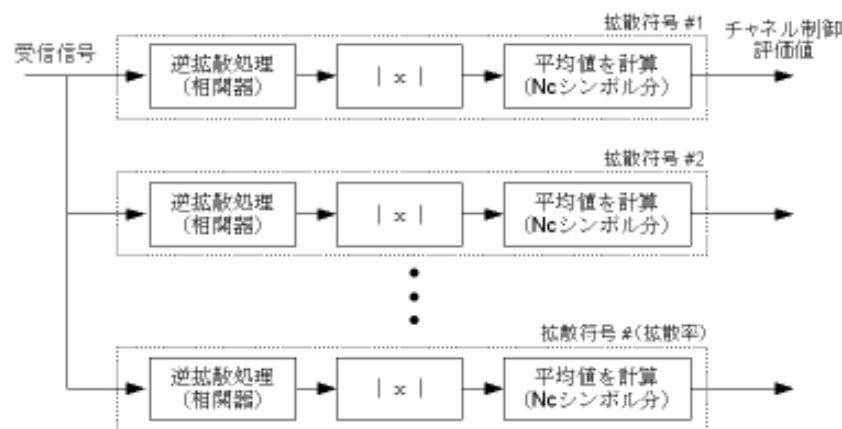


図 4-2-2 逆拡散信号受信振幅監視方式を実現する機能ブロック

4-2-4 拡散符号の選択方法

図 4-2-2 のブロックにより評価値 $\bar{\xi}_k$ が得られた後、その値を用いて拡散符号を選択する方法について示す。

干渉量の評価値である $\bar{\xi}_k$ の値が大きいほど、その符号の使用されている可能性は高く、その符号チャンネルで発生している干渉量は大きい。そこでまず、拡散符号を $\bar{\xi}_k$ の値が小さいものから順に並べ替える。そして、値の最も小さいものから規定の割合 (P_N %) 分を対象としてひとつをランダムに選択する。ランダムに選択することで、複数の車両が、同一の符号を選択する確率を分散させている。

4-2-5 評価結果

それぞれの拡散率及び拡散符号を選択する割合 P_N の値について、車両台数に対するチャンネル制御の際に得られた評価値 $\bar{\xi}_k$ の平均を評価する。

評価値 $\bar{\xi}_k$ の平均を図 4-2-3 及び図 4-2-4 に示す。なお、図 4-2-3 は $P_N = 30\%$ の場合の特性を、図 4-2-4 は $P_N = 100\%$ の場合の特性を示す。これらの図より、車両台数が増加するに従い、評価値 $\bar{\xi}_k$ は増加している。車両台数が増えたと、同時に送信されるパケット数も増加する。これは、干渉源となるパケットの数が増加することと等価であり、すなわち発生する干渉の量も車両台数の増加にしたがって増えることになる。また、これらの特性の傾きは、拡散率が低い程、傾斜が大きいことがわかる。複数車両間で同一の拡散符号を使用すると、干渉の大きさは急激に増加する。そのためこの傾きは、各拡散率における、複数車両間で同一の拡散符号を使用する可能性が大きければ大きいほど増加する。したが

って、逆拡散信号受信振幅を監視することにより干渉量の評価が可能であることがわかった。

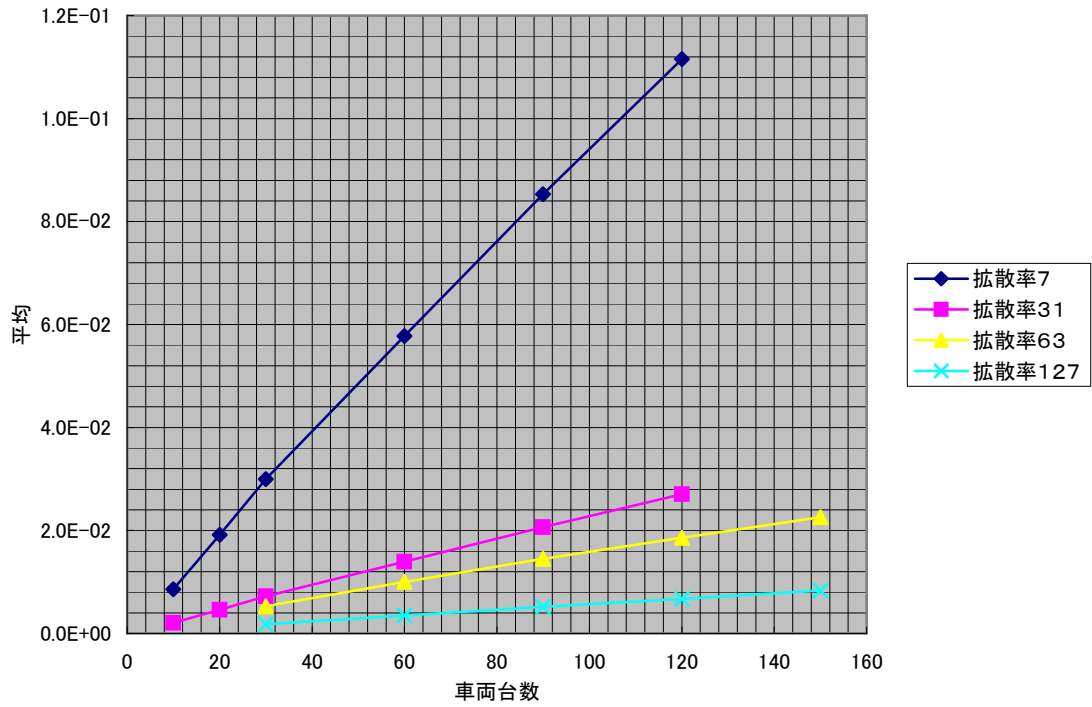


図 4-2-3 車両台数に対する評価値 $\bar{\xi}_k$ ($P_N = 30\%$)

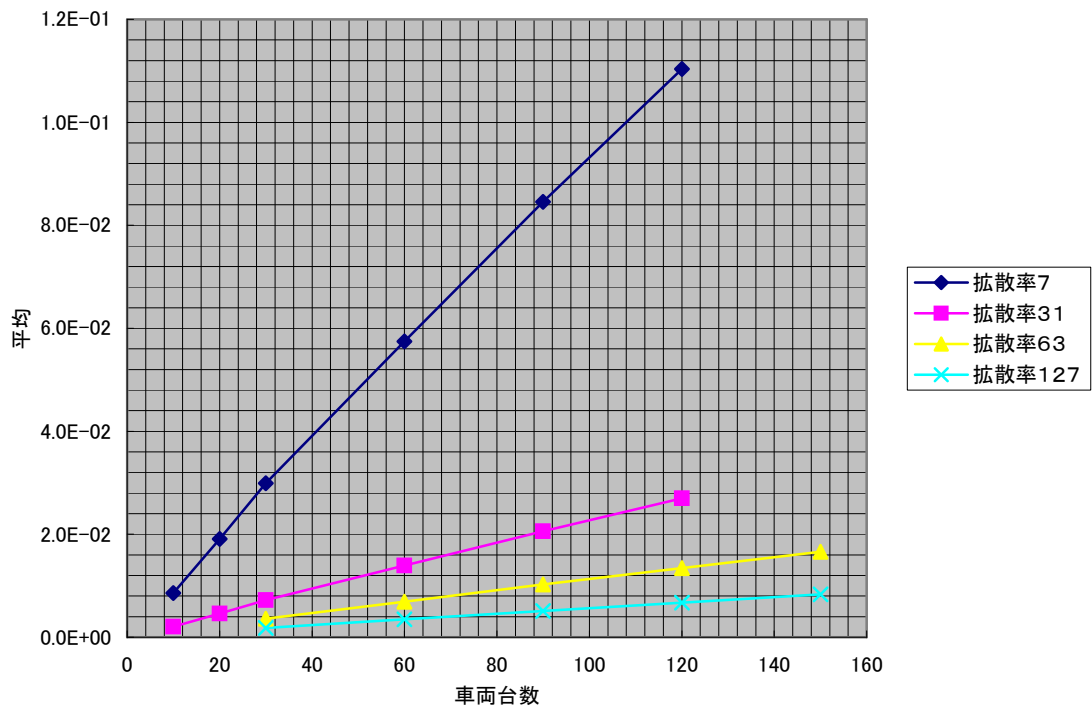


図 4-2-4 車両台数に対する評価値 $\bar{\xi}_k$ ($P_N = 100\%$)

4-2-6 達成状況

今年度は、チャネルの干渉量(MAI)を監視し、基準をクリアする通信品質のよいチャネルを自立的に選択する方式の検討として、逆拡散信号受信振幅監視方式について検討した。干渉量を示す指標として評価値 $\bar{\xi}_k$ を定義し、この評価値、即ち干渉量の小さいものから並び替え、干渉の少ない符号から一定の割合でランダムに選択する方式を考案して4-1項に述べたシミュレーションに実装した。

評価値 $\bar{\xi}_k$ は、干渉量を監視するための指標として使用できることがわかった。一方、拡散率を大きくしていくと傾きが小さくなり、干渉量評価の精度が悪くなる恐れがある。今後は、更に干渉量評価の精度向上の手段を検討する必要がある。

以上のように、今年度計画に対して100%の目標を達成した。また、今年度の検討により、次年度以降の検討課題が明らかになった。

4-3 中継パケット高速転送技術の研究開発

4-3-1 研究開発概要

本サブテーマでは、パケット受信から次ホップ先に向けた送信開始までの処理時間短縮が課題である。この課題を克服するため、本研究開発ではラベルスイッチング手法を取り入れたルーティングの高速化技術、輻輳やループ化を防ぐフラディング手法を低レイヤで実現するためのカットスルー転送方式を開発する。

今年度は、次年度に実施予定である高速転送処理装置の詳細設計の基礎となる概念設計を実施した。具体的には、ラベルスイッチング機能とフラディング機能に関する方式設計を行い、解析、シミュレーションおよび実験的に性能評価を実施した。

4-3-2 実施状況

中継パケットの転送処理を高速化するには、受信パケットのヘッダ部に含まれる中継情報をより早く処理することが効果的である。これは、従来IPレイヤで行われるルーティング処理を低レイヤで実行する手段、即ち広義のラベルスイッチング手法、およびフラディングによるパケット中継の要素技術として有効性が高い。そこで、パケットの受信中にヘッダ部分を抽出して中継判定処理を行う方式と機能ブロック構成を検討し、遅延特性をシミュレーション及び解析により求めた。

また、パケット中継の際に避けられないプロトコル処理のオーバーヘッドによる遅延を抑圧するための中継方式に関して、実験的に性能評価を行った。

4-3-3 高速ヘッダ処理によるパケット中継方式

従来の自律無線通信システムでは受信したパケット全体を一度バッファに格納しパケットをどのポートに送信(フォワード)すべきか判断する。この処理を高速化するため、パケットを受信する途中でヘッダ部分を抽出して中継転送処理の判断を行う方式を考案した。このような方式として、以下の4つの方式がある。

方式1: カットスルー方式

パケットのヘッダから宛先のMACアドレスを読み出し、パケットを全部受信する前に経路探索テーブルを検索し、宛先のポートに転送する方式。パケット全体をバッファリングする必要が無いために遅延が少なく、良好なスループットが得られる。読み込むデータ長が一定のため、転送速度も一定になる。ただし、データ部のエラーチェックが行われなため、エラーパケットもフォワーディングしてしまう可能性があり、ネットワークの帯域幅を無駄に消費するリスクがある。

プリアンブル	宛先 MAC	送信元 MAC	タイプ	データ	FCS
--------	-----------	------------	-----	-----	-----

図 4-3-1 カットスルーにおける読み取り部分

方式2：ストア&フォワード方式

フレームすべてをいったんメモリに読み込み、ヘッダのMACアドレスを検査して経路探索テーブルを検索した結果、宛先ポートに送り出す方式。すべてをメモリに読み込む時間が必要であり、その分の遅延が発生する。FCSとしてCRC(Cyclic Redundancy Check)によるエラーチェックを行い、正しいフレームのみ宛先ノードに送出するため、無駄なトラフィックの発生を制御している。データサイズが可変長となるので、転送速度は一定にはならない(フレームの長さによって遅延が異なる)。

プリアンブル	宛先 MAC	送信元 MAC	タイプ	データ	FCS
--------	-----------	------------	-----	-----	-----

図 4-3-2 スタア&フォワードにおける読み取り部分

方式3：フラグメントフリー方式

イーサネットでは、64バイト送出の間に必ずケーブル端にパケットが到達することから、最初の64バイト部分のみの衝突を監視してパケット転送を判断するフラグメントフリー方式が用いられる。カットスルーに近い固定遅延となるが、本研究の対象である無線通信では、エラー発生や衝突のおこるタイミングを限定できないため、この方式はイーサネットと同等の性能を期待することはできない。

プリアンブル	宛先 MAC	送信元 MAC	タイプ	データ 1	データ 2	FCS
--------	-----------	------------	-----	-------	-------	-----

↓
64バイト

図 4-3-3 フラグメントフリーにおける読み取り部分

方式4：エラーフリーカットスルー

パケットエラー率が一定以下ならカットスルーで、一定以上になると、エラーパケットをチェックするストア&フォワードに自動的に切り替える方式。2つの方式の利点をうまく利用することにより、高速性と信頼性を実現している。

方式3は方式1以上の性能が期待できないこと、及び方式4は方式1と方式2の中間的な性能であることが推定できるため、今年度は方式1及び方式2について定量的な検討を行った。

(1) フレームフォーマット

図4-3-4に示すフレームフォーマットを前提とする。本検討では、ヘッダ部のみを抽出した処理を行うため、ヘッダ部とデータ部に独立した誤り検出符号CRC1とCRC2を付加することとした。

ヘッダ UW	ラベル	CRC1	データ	CRC2
-----------	-----	------	-----	------

図 4-3-4 フレームフォーマット

(2) 転送遅延要素

チャンネル構成技術としてスペクトラム拡散通信に基づく符号分割多元接続 (CDMA; Code Division Multiple Access) 方式を採用している。この場合の転送遅延要素としては、物理層では、高周波アナログ送信・受信処理、ベースバンド変復調処理、チャンネル符号化・復号処理がある。今年度はこのうち MAC 層に起因する遅延を検討対象とした。MAC 層に起因する遅延要因は更にヘッダ処理、転送判定処理、データ処理に分類できる。

(3) ラベルによる転送判定処理方式

ラベル内容に基づき、①自ノードで終端するパケット、②中継するパケット、③自ノードで受信しかつ中継するパケット、を判定する。本検討で前提としているラベル内容および転送判定の方法を表 4-3-2 に示す。同表に示す判定の AND 条件に基づき、上記①～③を判定する。

表 4-3-1 ラベル

項目	内容	判定
1	ID(0)	自車両 ID
2	ID(1)	送信相手が自車両の場合、受信のみ行う 送信相手が自車両以外の場合は、NID を参照し転送判断を行う
3	NID	次に中継して欲しい車両の ID NID が自車両の場合、転送処理を行う。 NID が自車両でない場合終端処理を行う。

(4) 機能ブロック構成

方式 1 : カットスルー方式

図 4-3-5 に、カットスルー方式による中継パケット転送の機能ブロック構成を示す。

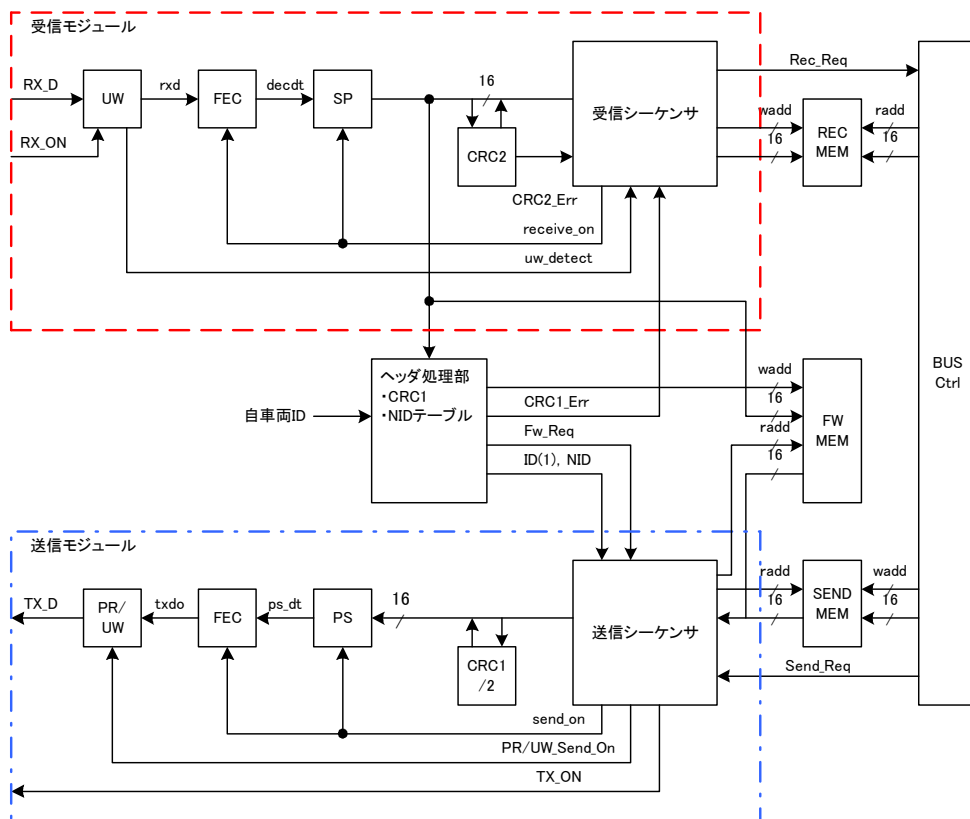


図 4-3-5 カットスルー方式機能ブロック構成

受信モジュールはすべての期間ユニークワード(UW)を監視する。UWが検出されると、誤り訂正とシリアルパラレル変換部に同時にデータを入れて16ビット単位にする。16ビット単位のデータができると、ヘッダ処理部と受信シーケンサに入力する。ヘッダ処理部では転送用メモリに受信データを格納しつつ、MACヘッダ部に付加されたCRC1を計算してヘッダ部に誤りがあるかどうかを確認し、誤りを検出したらデータを破棄する。受信シーケンサでは受信メモリに受信データを格納しつつ、CRC2を計算し誤りを検出したら受信メモリに格納した受信データを破棄する。ヘッダ処理部ではヘッダ部に誤りがない場合、

- ① ヘッダ部からラベル内容 {ID(1)、NID} を取り出し ID(1) を調べる。
- ② ID(1) が自車両の場合、受信のみを行う。ID(1) が自車両で無い場合、NID を参照する。
- ③ NID が自車両の場合、ID(1) への転送処理を行うため、経路探索テーブル (ルーティングテーブル) から ID(1) までの経路上の直近車両 ID : 新しい NID を検索する。送信シーケンサに新しい NID と ID(1) を報告すると同時に、受信データの転送を要求する。

※この時 ID(1) までのホッピング回数が“0”である場合、新しい NID は不要であるから、送信シーケンサに ID(1) のみを報告する。

- ④ NID が自車両でない場合、転送用メモリに格納した受信データを破棄する。送信シーケンサではヘッダ処理部から転送要求が来たとき、自車両の送信中でなければ、転送用メモリから受信データを読み出し送信を開始する。この時ヘッダ部のホッピング回数にプラス1を行う。

方式2：ストア&フォワード方式

図4-3-6に、ストア&フォワード方式による中継 packets 転送の機能ブロック構成を示す。

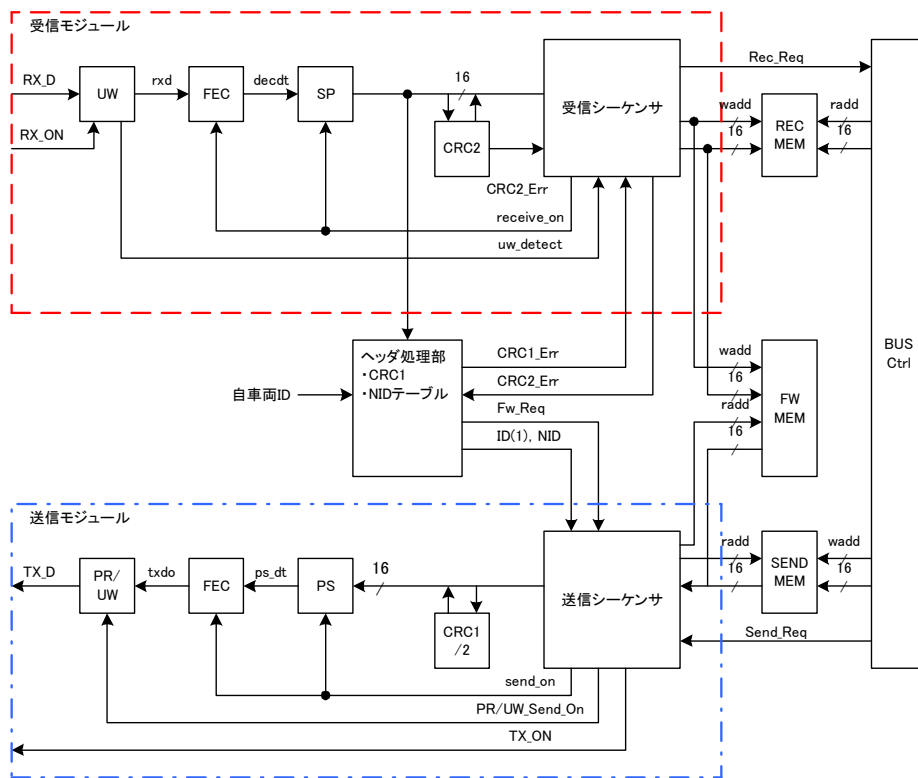


図 4-3-6 ストア&フォワード処理ブロック

受信モジュールはすべての期間 UW を監視する。UW が検出されると、誤り訂正とシリアルパラレル変換部に同時にデータを入れて 16 ビット単位にする。16 ビット単位のデータができると、ヘッダ処理部と受信シーケンサに入力する。ヘッダ処理部では CRC1 を計算してヘッダ部に誤りがあるかどうかを確認し、受信シーケンサに CRC1 の確認結果を報告する。CRC1 で誤りを検出した場合は、受信データを破棄する。受信シーケンサでは受信メモリ及び転送用メモリに受信データを格納しつつ、データ部の CRC2 を計算し誤りがあるかどうかを確認する。CRC2 で誤りを検出した場合は、受信データを破棄する。ヘッダ処理部ではヘッダ部に誤りがない場合、カットスルー方式と同様に上記①-④を実行する。

(5) パラメータ条件

前提としたパラメータ条件を表 4-3-2、表 4-3-3 に示す。

表 4-3-2 フレーム構成パラメータ

項目	ビット数	備考
データ長	200*8=1600	
ヘッダ長	18*8=144	従来装置のヘッダ長 (6byte) + ラベル長 (12byte)
ラベル長	12*8=96	
データ CRC	16	

表 4-3-3 ヘッダ部パラメータ

名称	ビット数	詳細
MAC ヘッダ	6*8=48	ヘッダ長、LPDU 長、シーケンス番号等
ID(0)	4*8=32	自車両 ID
ID(1)	4*8=32	送信相手 ID
NID	4*8=32	次に中継して欲しい車両の ID

(6) ヘッダ部の受信品質評価

ヘッダの受信誤りはパケット転送処理の誤りに直接結びついてしまうため、前述のとおりヘッダ部に CRC を付加しヘッダ部の受信誤りを独立に検出できる構成とした。ヘッダ部受信品質を高めるために、ヘッダ部の拡散率を大きくして情報伝送速度をデータ部よりも低速とする方法が考えられる。これは、スペクトル拡散通信方式の大きな特徴のひとつである拡散ゲイン制御等による可変データ伝送により実現することで可能となる。

一般的に、CRC のビット数をより多くするとバースト誤り未検出の確率をより小さくすることが可能となるが、ヘッダ部の CRC ビット数の増加は、ヘッダ処理時間の増加を招く。また、ヘッダ部の拡散率を上げることでヘッダ部の受信品質をより高めることは可能となるが、ヘッダ部の伝送時間が増加するためヘッダ処理時間の増加に結びついてしまう。このように、ヘッダ部の受信品質とヘッダ処理時間はトレードオフ関係となる。以下では、ヘッダ処理時間に支配的な実際のヘッダ時間長に影響を与える、ヘッダ部の CRC ビット数、ヘッダ部 1 ビット長 (伝送速度の逆数) に関して検討した。

a) ヘッダ部 CRC 信頼度に関する評価パラメータ

本研究開発成果の適用が考えられる車車間通信のような移動体通信では、フェージングによるバースト誤りがビット誤りの主要因と考えられるため、大きなバースト誤りが発生する確率が高い。そこで、本検討では、

『長さ $N > K + 1$ のバースト誤りで、検出されない誤りの割合は、 2^{-K} である』
(K は生成多項式次数)

という性質より、誤り検出率を 2^{-K} とした。

b) ヘッダ部受信品質に関する評価パラメータ

ヘッダ部の1ビット長を、主情報データ1ビット長の整数倍とすることにより、1ビット当たりの受信エネルギーを大きくし、すなわち1ビット当たりの受信SNRを大きくし、ヘッダ部受信品質を高めることができる。図4-3-7は、レイリーフェージング環境下における受信SNR対誤り訂正前ビットエラーレート（BER）を示す。一例として、データ部の誤り訂正前BERが 10^{-2} で受信されているような環境下で、ヘッダ部の誤り訂正前BERが 10^{-3} 以下とする場合を考える。同図より、ヘッダ部の1ビット当たりの受信SNR（Signal to Noise power Ratio）をデータ部の受信SNRに対して約10dB高める必要があることが分かる。これを実現するためには、ヘッダ部の1ビット長をデータ部の1ビット長の10倍にする必要がある。上述の考え方に基づきヘッダ部受信品質とヘッダ部1ビット長を関連付け、ヘッダ部受信品質に関するパラメータとして、移動体通信の評価に用いられることの多い“レイリーフェージング環境下におけるヘッダ部誤り訂正前BER”を適用した。

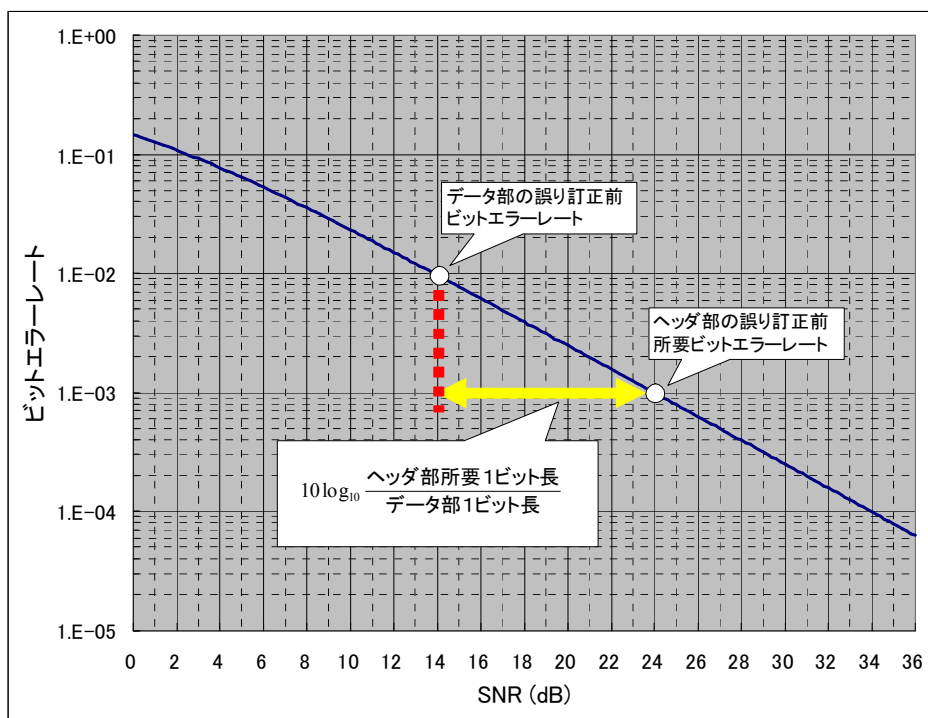


図4-3-7 レイリーフェージング環境下でのビットエラーレート

c) 評価結果

図4-3-8に、CRCビット数に対する長バースト誤り未検出率の結果を示す。PERが 10^{-5} 程度である場合を想定しても、誤り未検出率が 10^{-5} 程度あれば十分であると考えられることから、ヘッダCRCは16ビット程度が適切であると考えられる。

図4-3-9に、ヘッダ部1ビット長（データ部1ビット長で正規化した値）に対するヘッダ部ビットエラーレートを示す。ヘッダ部の拡散率を上げることでヘッダ部のBERは向上するが、ヘッダビット長/データビット長が10であればBERは1/10に改善される。このパラメータはヘッダ部の受信品質、転送遅延時間に関するアプリケーション要求に基づき適切な設定が必要である。

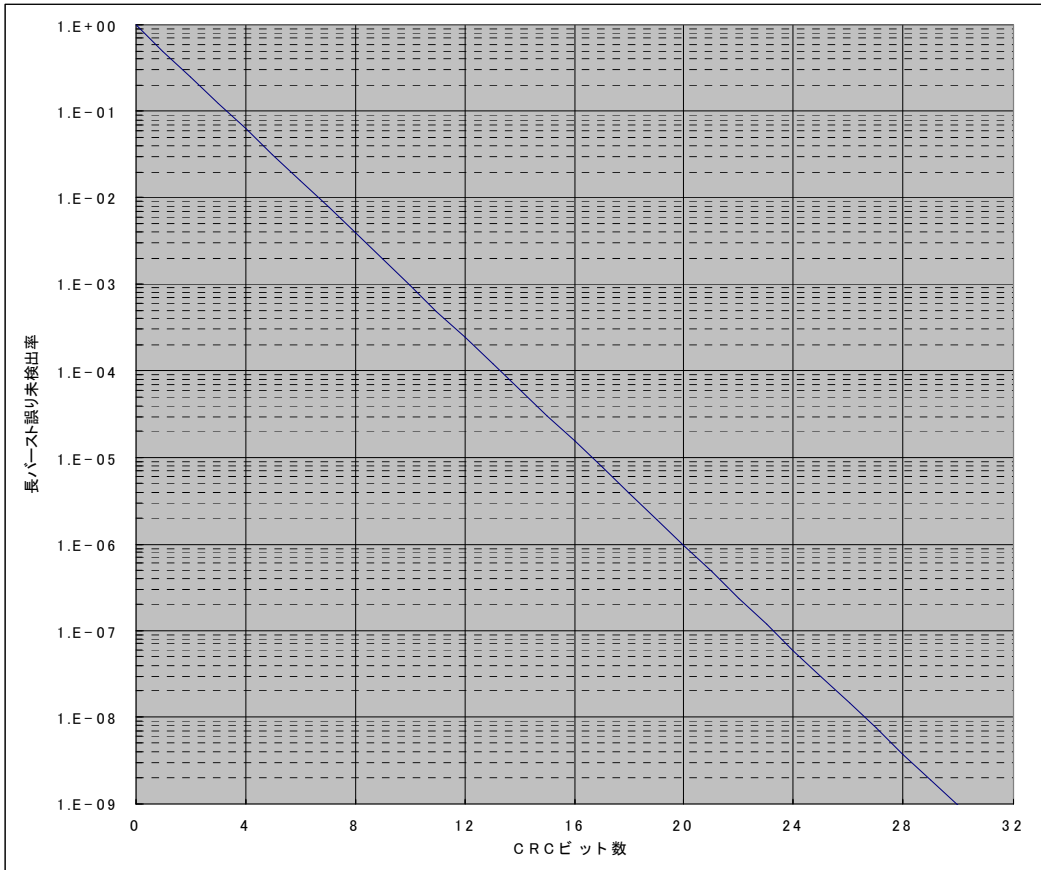


図 4-3-8 長バースト誤り未検出率

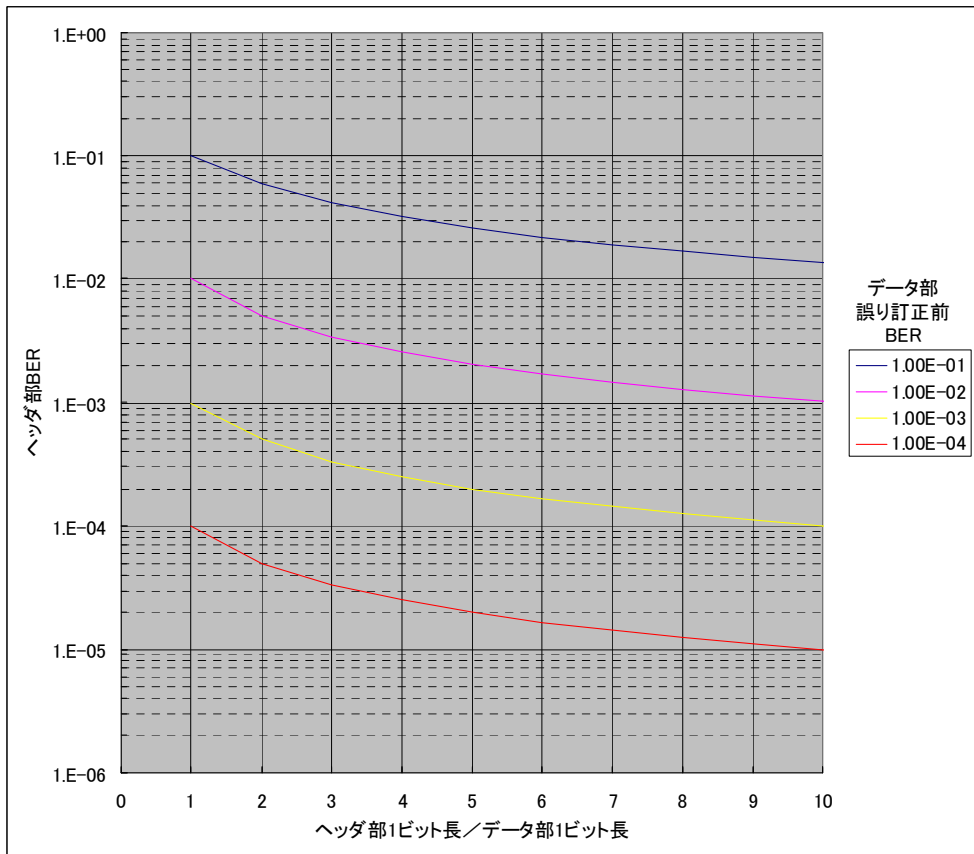


図 4-3-9 ヘッダ部 BER

(7) ラベルによる転送判定部の遅延評価

ラベルによる転送判定処理を実現するためには、以下の課題を解決する必要がある。

- 車両 ID を 32 ビットとし、直接 ID(1) を経路探索テーブルのアドレスとすると、経路探索テーブルが 16G バイト RAM = 2^{32} ワード × 32 ビットとなり、実現は可能であるが、高価な装置となる。
- 通常の packets と同じフォーマットで送信するので、経路探索テーブルを作成するための packets のデータ部を 1536 バイト以下とする必要がある。

本検討では、この解決手段として、経路探索テーブルは最大 256 台分とし、メモリ内容を引数として、アドレスを検索できる CAM (Content-Addressable Memory) を用いて、ID(1) までの経路情報を格納した経路探索テーブルのアドレス (256 台分) を検索する方法を用いることとする (1 台当たりの経路情報を 5 バイト = ID (4 バイト) + HOP (1 バイト) として、1280 バイト = 256 台 × 5 バイト)。

4-3-7 項に示したラベルによる転送判定処理①～④を実行するにあたり、

- ① ID(1) の条件判定と NID の条件判定を同時に行う。
- ② CAM (Content-Addressable Memory) を用いて、ID(1) までの経路情報を格納したルーティングテーブルのアドレスを検索する。
- ③ CAM で検索したアドレスをルーティングテーブルの引数として、ID(1) までの経路上の直近車両 ID を取得する。=NID 取得

の条件を設定すると $1 \mu \text{sec}$ の固定遅延が実現可能と考えられ、無視することができる。

(8) データ処理部の評価

データ処理部では CRC2 による誤り検出を行う。順次、受信データを入力して CRC を計算し、CRC2 の最後のビットを受信後、すぐにデータ部に誤りがあるかどうか確認することができるので、データ処理部による処理時間は、データ + CRC2 の長さから求まる固定遅延と考えることができる。

(9) 転送遅延時間評価

転送遅延時間を、ヘッダの受信開始時刻から転送開始時刻と定義すると、カットスルーとストア&フォワードのそれぞれの方式での転送遅延時間は以下ようになる。なお、前章までの評価によればラベル判定処理時間および CRC 判定処理時間は無視できるため、これらの時間を 0 とした。

- カットスルー方式における転送遅延時間
=ヘッダ部処理時間+ラベル判定処理時間
=(ヘッダ時間長+ヘッダ CRC 時間長+ヘッダ CRC 演算時間) +ラベル判定処理時間
=ヘッダ時間長+ヘッダ CRC 時間長
- ストア&フォワード方式における転送遅延時間
=ヘッダ部処理時間+ラベル判定処理時間+データ部処理時間
=(ヘッダ時間長+ヘッダ CRC 時間長+ヘッダ CRC 演算時間) +ラベル判定処理時間
+ (データ時間長+データ CRC 時間長+データ CRC 演算時間)
=ヘッダ時間長+ヘッダ CRC 時間長+データ時間長+データ CRC 時間長

上記の関係式より求めたカットスルー方式とストア&フォワード方式の転送遅延時間を図 4-3-10 に示す。(6) の考察に基づきヘッダ CRC は 0 から 16 ビットまでを対象としたが CRC ビット長は全体からの割合が比較的小さい場合は packet 全体の転送遅延に及ぼす影響は小さい。また、カットスルー方式はデータ部の受信を待つ必要がないため、ストア&フォワード方式の 1/4 程度の遅延であることがわかる。

ヘッダビット長／データビット長 (=ヘッダ部拡散率／データ部拡散率)に対する転送遅延時間を図 4-3-11 に示す。ストアアンドフォワード方式では遅延時間自体が大きいため、ヘッダ部ビット長を大きくする影響は割合としては小さいが、カットスルー方式ではヘッダビット長にほぼ比例して遅延が増加することがわかる。しかしカットスルー方式の遅延時間の優位性は変化しない。

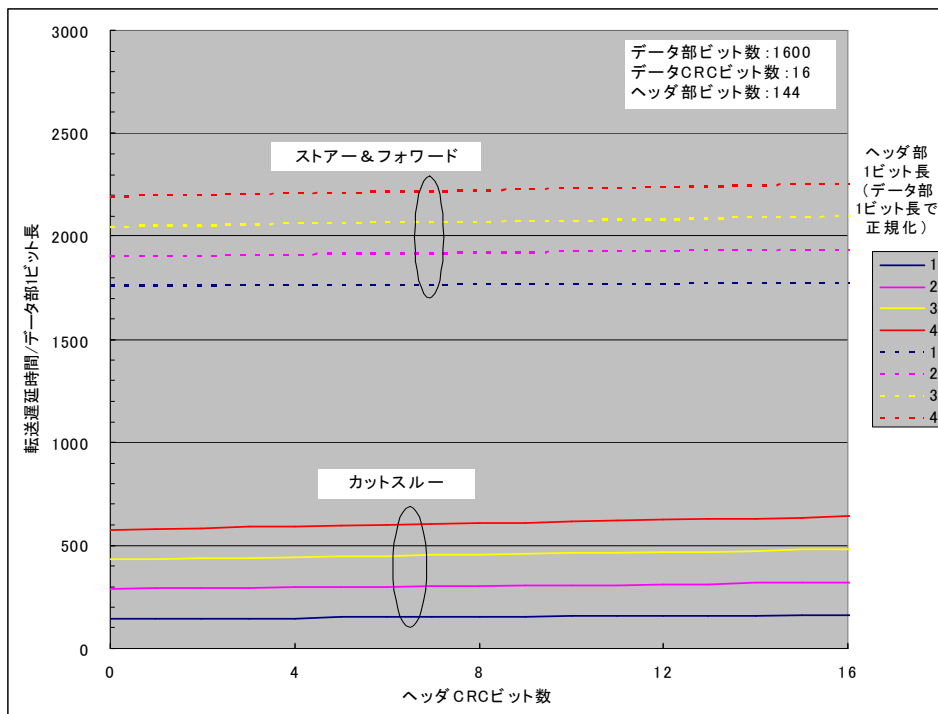


図 4-3-10 転送遅延時間

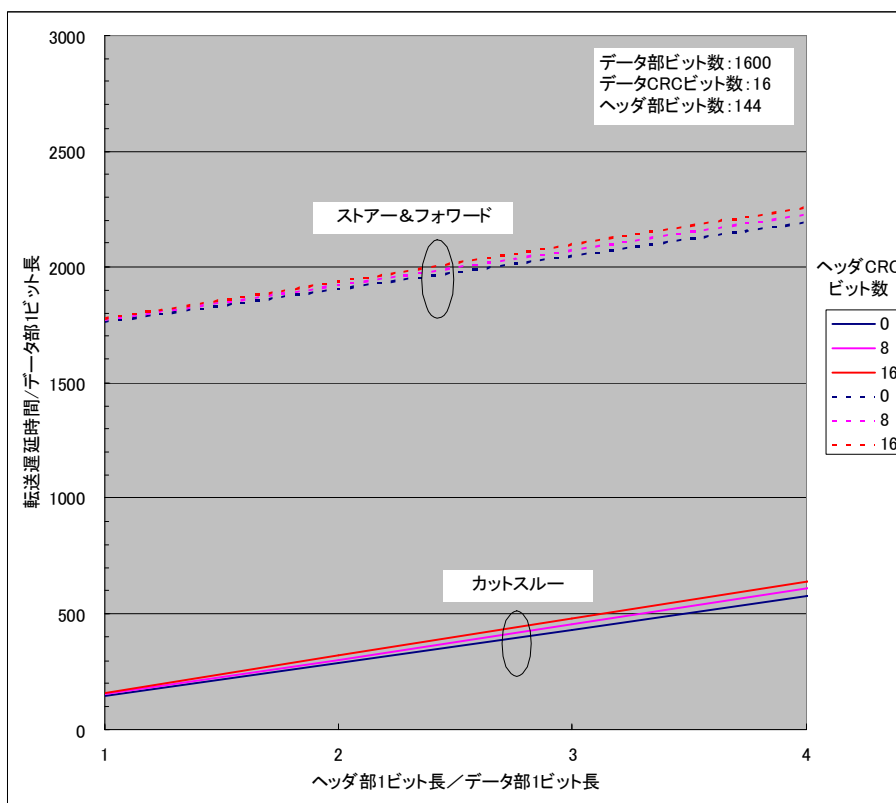


図 4-3-11 転送遅延時間

4-3-4 パケット多重化による送信オーバーヘッド抑圧技術

サイズの小さいパケットを頻繁に送信する場合、プロトコル処理遅延の相対比率が高まり、回線使用効率の低下を招くと同時にレスポンス性の低下を引き起こす。この影響を抑圧するための手法として、同一リンク・同一方向に送信される小サイズパケットを複数個多重化して1パケットにまとめる手法「パケットパッカー(PP)方式」を開発した。

(1) 実験システム構成

ネットワークモデルは、図 4-3-12 に示すように 3 つのアクセスポイント (AP) からなるメッシュネットワークで、両端の AP に複数の端末が接続している状態を仮定する。両端の端末間に複数のセッションが存在する場合のパケット誤り率 (PER) と平均片方向遅延を評価指標とする。本検討では、自律無線ネットワークとして従来の IEEE802.11 アドホックモードを AP 間のプロトコルとして使用し、実験的な評価を行った。アプリケーションとして比較的小サイズで高リアルタイム性を要求するパケット伝送が必要な VoIP を使用したため、160 バイトの RTP パケットを 20msec ごとに送信している。

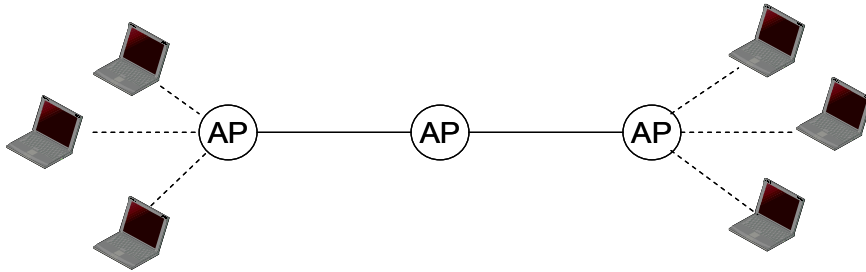


図 4-3-12 実験システムのネットワークモデル

(2) 従来方式の性能

従来方式におけるセッション数に対する PER 及び片方向遅延特性を図 4-3-13 に示す。3 セッションまでは PER、遅延ともに大きな増加はないが、4 セッションを超えると急激にこれらの特性が劣化することがわかる。

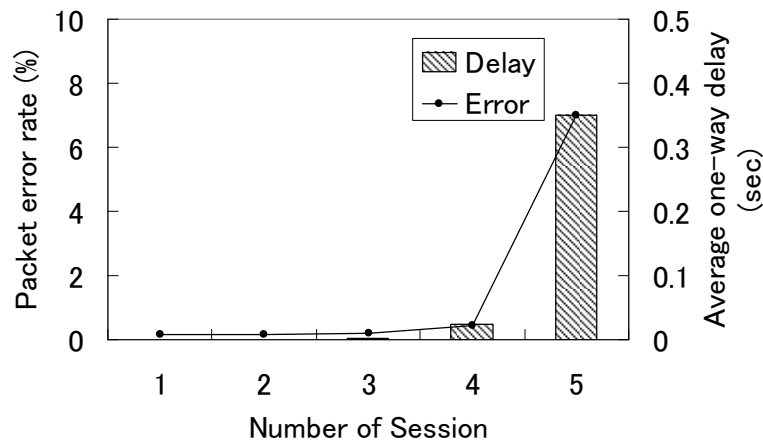


図 4-3-13 同時セッション数に対する PER 及び平均片方向遅延特性 (従来方式)

(3) PP 方式の性能

従来方式では 160 バイトパケットがそれぞれ独立に AP 間を中継されているが、PP 方式は、同一リンク・同一方向に中継される複数パケットを 1 パケットに多重化する手法である。これにより、1 パケットのサイズは従来方式に比べて多重化されるパケット数程度の倍数に大きくなるが、ヘッダ処理や送信処理に係る遅延時間を短縮できる。実験で取得した従来方式と PP 方式のセッション数に対する片方向遅延特性を図 4-3-14 に示す。4 セッションでは従来方式(Static)とほぼ同等な特性を示しているが、5 セッションでは PP 方式による特性の改善が著しいことがわかる。また、表 4-3-3 に PER 特性を示す。ここでも 5 セッション時に PP 方式の大幅な特性改善が見られることがわかる。

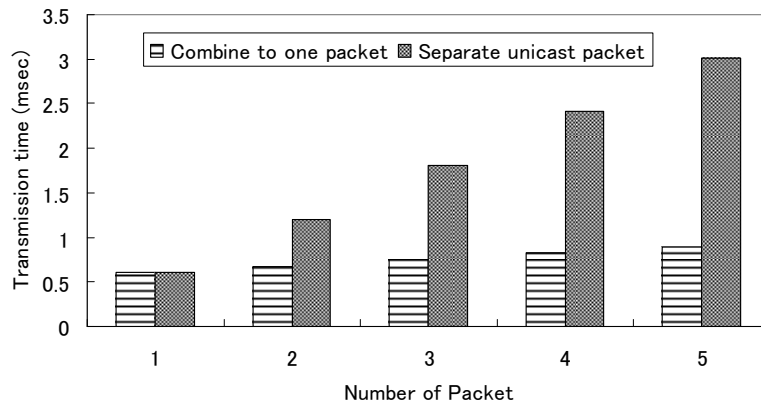


図 4-3-14 同時セッション数に対する平均片方向遅延特性

表 4-3-3 同時セッション数に対する PER 特性

同時セッション数	従来方式	PP 方式
1	0.000%	0.002%
2	0.000%	0.000%
3	0.027%	0.320%
4	0.220%	0.353%
5	7.020%	0.033%

(4) 評価

前項で示したように、PP 方式を導入することで、同時接続セッション数が多い場合に中継遅延を大幅に圧縮することが可能であることが実証できた。また、同時に PER 特性も大きく改善した。このように PP 方式はパケット中継において効果的にプロトコル処理による遅延を抑制することが可能であることが実証できた。

4-3-5 達成状況

来年度実施予定の高速転送処理装置の詳細設計のための基礎となる高速ヘッダ処理によるパケット中継方式について検討した。ハードウェア実現のための機能ブロックを検討し、遅延に関して理論及びシミュレーションにより評価を行った。カットスルー方式、ストア&フォワード方式の 2 方式について定量的に MAC 処理の転送遅延時間に関する基本検

討を行った結果、高速ヘッダ処理の効果が期待でき、特にカットスルー方式では大幅な中継時の遅延短縮が可能であることがわかった。

また、パケット多重化による送信オーバーヘッド抑圧技術として PP 方式を開発し、実験システムに実装して性能評価を実施した。その結果、中継ノードにおいて同時に 5 セッションの通信を行う際、大幅な遅延短縮と PER 特性の改善が実証できた。

以上のように、今年度計画に対して実施内容は 100%達成している。

4-4 アーキテクチャ・システム化技術の研究開発

4-4-1 研究開発概要

高レスポンス性要求に対して効果的な要素技術をシステムとして構成し、性能を十分引き出すためのアーキテクチャとして、クロスレイヤアーキテクチャが重要な開発課題である。遅延の最小化を図るためには、様々な情報をレイヤにまたがって活用することが必要であり、そのためのアーキテクチャを開発する必要がある。

今年度は、次年度以降に詳細設計および試作を行う変復調装置、チャネル制御装置および高速転送処理装置にクロスレイヤアーキテクチャを反映させるために、レイヤ間で授受するデータやパラメータ等の項目の抽出およびインタフェース形態の概念設計を実施すると同時に、一部実験的な評価を行う。

4-4-2 実施内容

高レスポンス性要求に対して効果的な要素技術をシステムとして構成し、性能を十分引き出すためのアーキテクチャを開発することが、本サブテーマの課題である。そのためには、利用シーンに基づく通信モデルを設定し、アプリケーション要求を明確化することが必要である。そこで、研究成果の実装アプリケーションとして最も有望で、かつ高い通信性能を要求すると考えられる車車間通信において、通信モデルの設定とアプリケーション要求の概要について検討した。

また、自律無線通信システムの高レスポンス化のためのクロスレイヤアーキテクチャを考案し、シミュレーションにより基本性能を評価した。

4-4-3 交通事故データの解析

解析に用いたデータは、警察庁発行の平成 16 年度版交通事故統計年報と（財）交通事故総合分析センター（ITARDA）発行の平成 16 年度事故統計データである。これらを用いて、通信システムにより防止されることが期待できる交通事故件数を求めた。解析は、右折事故、出会い頭事故、正面衝突事故、追突事故、左折事故、車線変更に伴う事故、歩行者事故の各事故類型ごとに行った。交通事故の発生原因は様々なものがあり、すべてを通信システムにより回避することは困難である。今回の解析では、事故の原因となった法令違反のうち、主に安全運転違反といった運転手の不注意による事故を通信システムが有効な事故と考えた。そこで、各事故類型に該当する事故件数を、4つの条件項目（道路形状、1当車種、2当車種、1当の法令違反）に一致する事故を使用した資料から算出した。なお、ここで1当、2当とは、それぞれ事故に対してその原因となる重大な過失を持つ当事者と過失がより軽微な当事者を指す。対象となる事故件数は、下式により算出した。

$$[1 \text{ 当の法令違反条件該当件数}] \times [道路形状条件該当件数の割合] \times [1 \text{ 当車種条件該当件数の割合}] \times [2 \text{ 当車種条件該当件数の割合}] \quad \dots \text{式 4-4-1}$$

以下、各事故類型における算出結果を示す。

右折事故

表 4-4-1 右折事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	交差点
1 当車種	四輪車または二輪車
2 当車種	四輪車または二輪車または軽車両
1 当の法令違反	安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度違反)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次に様に求められた。

対象となる右折事故件数

$$52000 \times 0.8179 \times 0.9790 \times 0.9992 = 52000 \times 0.8000 = 41600$$

対象となる右折死亡事故件数

$$113 \times 0.8796 \times 0.9839 \times 1.0000 = 113 \times 0.8654 = 97$$

出会い頭事故

表 4-4-2 出会い頭事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	信号機のない交差点
1 当車種	四輪車または二輪車
2 当車種	四輪車または二輪車または軽車両
1 当の法令違反	一時不停止、安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度違反)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次の様に求められた。

対象となる出会い頭事故件数

$$157510 \times 0.7065 \times 0.9278 \times 0.9993 = 157510 \times 0.6550 = 103169$$

対象となる出会い頭死亡事故件数

$$551 \times 0.5953 \times 0.8528 \times 0.9991 = 551 \times 0.5072 = 279$$

正面衝突事故

表 4-4-3 正面衝突事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	単路
1 当車種	四輪車または二輪車
2 当車種	四輪車または二輪車
1 当の法令違反	安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度違反)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次の様に求められた。

対象となる正面衝突事故件数

$$15728 \times 0.7820 \times 0.9437 \times 0.8555 = 15728 \times 0.6313 = 9929$$

対象となる正面衝突死亡事故件数

$$274 \times 0.9262 \times 0.9922 \times 0.9713 = 274 \times 0.8926 = 244$$

追突事故

表 4-4-4 追突事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	交差点または単路
1 当車種	四輪車または二輪車
2 当車種	四輪車または二輪車
1 当の法令違反	安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度違反)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次の様に求められた。

対象となる追突事故件数

$$246147 \times 0.9953 \times 0.9882 \times 0.9918 = 246147 \times 0.9754 = 240091$$

対象となる追突死亡事故件数

$$320 \times 0.9976 \times 0.9929 \times 0.7868 = 320 \times 0.7793 = 249$$

左折事故

表 4-4-5 左折事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	交差点または単路
1 当車種	四輪車
2 当車種	四輪車または二輪車または軽車両
1 当の法令違反	安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度違反)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次の様に求められた。

対象となる左折事故件数

$$31577 \times 0.9952 \times 0.9506 \times 0.9992 = 31577 \times 0.9452 = 29846$$

対象となる左折死亡事故件数

$$42 \times 1.0000 \times 0.9882 \times 1.0000 = 42 \times 0.9882 = 41$$

車線変更に伴う事故

表 4-4-6 車線変更に伴う事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	単路
1 当車種	四輪車または二輪車
2 当車種	四輪車または二輪車
1 当の法令違反	安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度違反)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次の様に求められた。

対象となる車線変更に伴う全事故件数

$$11587 \times 0.6875 \times 0.9688 \times 0.9265 = 11587 \times 0.6170 = 7149$$

対象となる車線変更に伴う死亡事故件数

$$30 \times 0.6585 \times 1.0000 \times 0.7804 = 30 \times 0.5138 = 15$$

歩行者事故

表 4-4-7 歩行者事故におけるデータ抽出条件

条件項目	条件値
道路形状	交差点または単路
1 当車種	四輪車
1 当の法令違反	安全運転違反(漫然)、安全運転違反(脇見)、安全運転違反(動静不注視)、安全運転違反(安全不確認)、安全運転違反(安全速度)

上記条件に該当する事故件数は、式 4-4-1 から次の様に求められた。

対象となる歩行者事故全件数

$$48559 \times 0.9229 \times 0.7927 = 48559 \times 0.7315 = 35520$$

対象となる歩行者死亡事故全件数

$$1240 \times 0.9940 \times 0.8416 = 1240 \times 0.8365 = 1037$$

以上から、通信システムにより回避が期待できる対象事故件数は、表 4-4-8 の通りとなった。

表 4-4-8 回避が期待できる死亡事故件数

	全死亡事故件数	対象死亡事故件数
右折事故	374	97
出会い頭事故	1169	279
正面衝突事故	908	244
追突事故	427	249
左折事故	85	41
車線変更に伴う事故	41	15
歩行者事故	2185	1037
その他	1895	0 (対象外)
合計	7084	1962

表 4-4-8 から、通信システムが有効と考えられる死亡事故件数は、前死亡事故件数の約 27% であり、通信システムは事故防止に対して有効であることが確認できた。

4-4-4 車車間通信モデルの検討

前項で得られたで回避が期待できる事故のうち、最も典型的な事故例を用いて通信システムに求められる通信性能及び通信モデルの検討を行った。検討内容は、以下の通りである。

手順 1 典型的な 7 つの事故類型（右折事故、出会い頭事故、正面衝突事故、追突事故、左折事故、車線変更に伴う事故、歩行者事故）に関してその交通流をモデル化し、そのモデルから、当該典型事故の発生を防止するための情報提供（各車の位置、速度、進行方向の提供）を車車間通信により行うために必要となる通信エリアを算出した。

手順 2 手順 1 で算出した必要な通信エリアを基に、事故類型毎に通信フィールドモデルを作成し、そのフィールドにおける受信電力分布を計算した。対象周波数帯は、DSRC で使用している 5.8GHz 帯と、屋外利用可能な無線 LAN である IEEE802.11b/g で使用している 2.4GHz 帯を選択した。なお、対象とする送信機 (Tx)・受信機 (Rx) の位置は、手順 1 でモデル化した 1 当車両および 2 当車両の軌跡から必要最小限に絞り込んだ。また、通信車両台数 100 台、通信周期 100ms、データパケット長 100Bytes というトラフィックを暫定的に想定し、そのトラフィックが発生した場合に、ビット誤り率 1.0×10^{-5} を満足するような回線とするために必要となる Rx 受信感度を計算した。これら受信電力分布と受信感度の比較から、1 ホップで通信可能なエリアの算出を行った。

手順 3 手順 2 で算出した通信可能エリアが、手順 1 で算出した必要な通信エリアをカバーすることができない場合には、マルチホップで通信する必要が生じる。車-車-車間でのマルチホップ通信を対象に、その中継方式についての検討を行った。

必要となる通信エリアの算出

事故の回避は、通信システムから警告を受けた運転者が車両を停止または安全な速度まで減速させることで可能であると考えられる。今回、車両制動にかかる時間の内訳を、ITARDA 発行の平成 15 年度交通事故例調査・分析報告書を基に、表 4-4-9 の様に設定した。

表 4-4-9 車両制動におけるフェーズ

フェーズ名称	時間 (秒)
システム遅延時間 (パケット到着からシステム反応までの時間)	0.3
情報提供時間 (運転手に危険情報を提供する時間)	1.0
認知-判断時間 (運転手が情報を認知し状況判断するまでの時間)	2.0
知覚-反応時間 (判断してから実際に行動を開始するまでの時間)	0.4
踏替時間 (アクセルペダルからブレーキペダルへ足を踏み替えるまでの時間)	0.2
踏込時間 (ブレーキペダルを踏み込み減速が始まるまでの時間)	0.1
定走時間 (上記の合計)	4.0

また、一般的に制動時間については、危険認知速度（システムが通信を始めた時間における車速） $V_1[m/s]$ 、目標速度（事故を回避する上での上限速度） $V_0[m/s]$ 、減速度 $\alpha[m/s^2]$ の3パラメータから求められる。以上から、通信開始から目標速度に減速するまでの時間 t と移動距離 L を以下の図4-4-1に示す関係で表すことができ、かつ次式4-4-2で求めることができる。

$$t_A = t_{A0} + t_{A1} = t_{A0} + \frac{V_{A1} - V_{A0}}{\alpha}$$

$$L_A = V_{A1}t_{A0} + V_{A0}t_{A1} + \frac{1}{2}(V_{A1} - V_{A0})t_{A1} = V_{A1}t_{A0} + \frac{V_{A1}^2 - V_{A0}^2}{2\alpha}$$

式 4-4-2

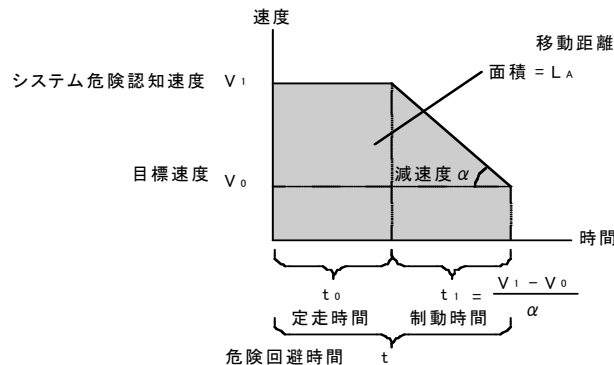


図 4-4-1 車両速度と制動距離の関係

以上を用いて、7つの事故類型別に関して通信エリアの算出を以下の様に行った。

- a)
- (ア) その事故類型のうち、回避できる可能性のある典型モデルを選択する。
 - (イ) 衝突時刻において、1当車両と2当車両がどのような状況になっていたとしたらその事故が回避できたか、を示す。
 - (ウ) その回避時の状況を生み出すためには、1当車両運転者に何秒前に情報提供を行えばよいかを計算する。
 - (エ) 1当車両運転者への情報提供時刻における1当車両の位置を計算する。
 - (オ) 1当車両運転者への情報提供時刻における2当車両の位置を計算する。
 - (カ) 1当車両運転者への情報提供時刻における1当車両位置、同時刻における2当車両位置および道路環境から、当該事故類型モデルの通信エリアを数式で示し、モデル構築に必要なパラメータを決定する。
 - (キ) 具体的な数値（適用上限値）をパラメータに代入して、必要なエリア範囲を算出する。
- b) 全ての事故類型モデルから、最も広範囲な通信エリアを必要とするパターンを算出し、必要となる通信エリアを決定した。
- これらにより算出した結果、最も通信距離を必要とする事故類型は、追突事故であった。このときに用いたパラメータ（表4-4-10）と算出結果を示す。

表 4-4-10 必要通信エリアの算出に用いたパラメータ (追突事故)

パラメータ	値	備考
1 車種別	普通車または大型車	
2 車種別	普通車または大型車	
1 車システム危険認知速度	120km/h (33.33m/s)	高速道路での速度を考慮 (普通車のみ)
	90km/h (25m/s)	スピードリミッタの搭載を考慮 (大型車のみ)
2 車システム危険認知速度	0km/h (0m/s)	停止
1 車目標速度	0km/h (0m/s)	停止
1 車目標速度	0km/h (0m/s)	停止
路面状態	乾燥	路面 μ は 0.8 となる
減速度係数	0.26	緩やかな減速であることを考慮 (普通車のみ)
	0.13	積載物を考慮して普通車の半分 (大型車のみ)

これらパラメータを基に式 4-2 で算出した結果、必要通信エリアは以下の通りとなった。

普通車の場合：L=411.04[m]、大型車の場合：L=412.50[m]

また、事故類型によっては交差点上で発生する交通事故がある。交差点上での事故では通信相手が直線上に存在せず、交差点中央よりも右または左側に位置する。このような位置にいる車両と通信するためには、回折を考慮する必要がある。最も大きい回折を必要とする事故類型は、出会い頭衝突事故であった。典型的な事故例では、2 当車両が優先道路を走行中に交差点左から 1 当車両が交差点に進入することで事故が発生している(図 4-4-2 参照)。このとき、2 当車両 (図 4-4-2 中 B) の位置は、事故発生時刻において交差点中央を定速で通過することを考えると、通信開始時刻における位置は次式 4-4-3 で求めることができる。これらにより、必要なパラメータと通信エリアは、以下の様になった。

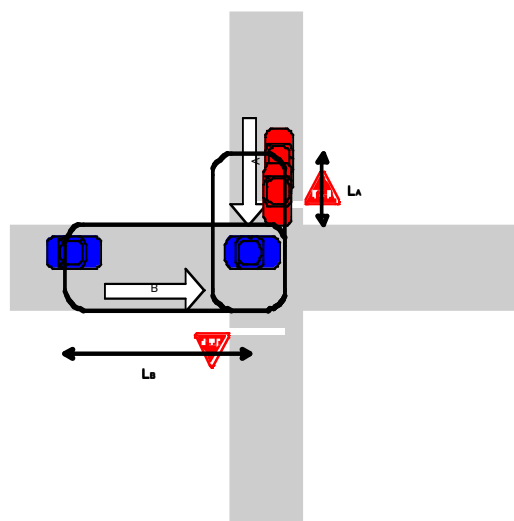


図 4-4-2 出会い頭事故と通信距離

$$L_B = V_{BtA} = V_B \left(t_{AO} + \frac{V_{AI} - V_{AO}}{\alpha} \right) = V_{BtAO} + \frac{V_B (V_{AI} - V_{AO})}{\alpha} \quad \text{式4-4-3}$$

表 4-4-11 必要通信エリアの算出に用いたパラメータ (出会い頭事故)

パラメータ	値	備考
1 車種別	普通車または大型車	
2 車種別	普通車または大型車	
1 車システム危険認知速度	15km/h (4.17m/s)	徐行速度を考慮
2 車システム危険認知速度	60km/h (16.67m/s)	一般路での速度を考慮
1 車目標速度	0km/h (0m/s)	停止
2 車目標速度	60km/h (16.67m/s)	2 車は定速通過
路面状態	乾燥	路面 μ は 0.8 となる
減速度係数	0.26	緩やかな減速であることを考慮 (普通車の場合)
	0.13	積載物を考慮して普通車の半分 (大型車の場合)

普通車の場合

$$L_A = 21.03 \text{ [m]}, L_B = 101.44 \text{ [m]}$$

大型車の場合

$$L_A = 25.37 \text{ [m]}, L_B = 136.19 \text{ [m]}$$

その他 5 種類の事故類型についても同様な検討を行った結果、7 種類の事故類型に対する必要通信エリアのうち、最も広範囲の通信エリアを必要とするケースを組み合わせると、図 4-4-3 に示す通信エリアが必要となった。また、今回明らかになった通信モデルの構築に必要なパラメータに関しては、表 4-4-12 の通りとなった。

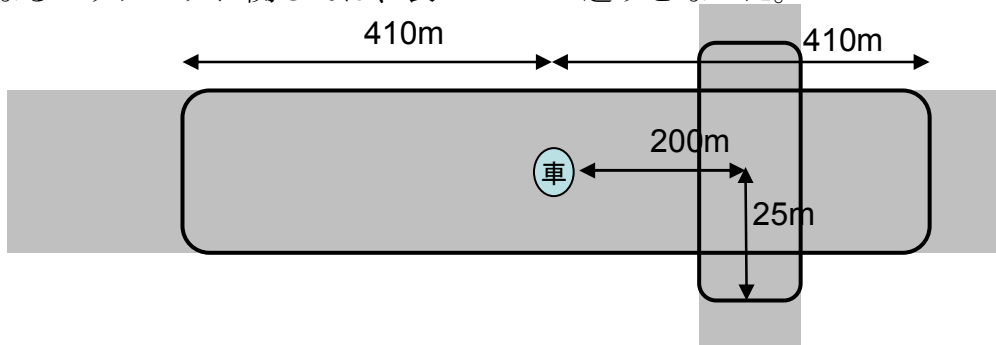


図 4-4-3 必要通信エリア

表 4-4-12 通信モデル構築のためのパラメータ

パラメータ	値	備考
1 当種別	大型車 普通車 二輪車	
2 当種別	大型車 普通車 二輪車 歩行者	
1 当システム危険認知速度	0km/h ~ 120km/h	左折車の交差点進入速度を考慮
2 当システム危険認知速度	0km/h ~ 120km/h	一般路の速度を考慮
1 当目標車速	0km/h ~ 80km/h	停止
2 当目標車速	0km/h ~ 80km/h	徐行
路面状態	乾燥 湿潤 積雪 凍結 非舗装	路面 μ は 0.8 となる
減速度係数	0.26	緩やかな減速であることを考慮

通信可能エリアの算出

算出した必要とする通信エリアから右折事故モデル、出会い頭事故モデル、追突事故モデルに対応させた通信フィールドモデルを作成し、その上で 5.8GHz 帯および 2.4GHz 帯の周波数に対する電波伝搬解析を行い、フィールド内に複数配置した Tx と Rx に関して、各 Tx に対する各 Rx の受信電力を計算した。なお、受信電力の計算に際しては、直接波に加えて 2 回までの反射と 1 回までの回折の影響を考慮した合成波を、3 次元レイトレース計算により求め計算した。

また、通信車両台数 100 台、通信周期 100ms、データパケット長 100Byte というトラフィックを想定し、そのトラフィックが発生した場合に、ビット誤り率 1.0×10^{-5} を満足するような回線とするために必要となる Rx 受信感度を計算した。この受信感度を上回る受信電力が得られるエリアを、通信可能エリアとみなすこととした。各周波数における Tx/Rx の設定パラメータ値を表 4-4-13 のように定めた。

表 4-4-13 各周波数帯の Tx/Rx 設定パラメータ

5.8GHz 帯 Tx/Rx 設定パラメータ		2.4GHz 帯 Tx/Rx 設定パラメータ	
項目	値	項目	値
周波数 (MHz)	5800	周波数 (MHz)	2400
Tx 送信出力 (dBm)	10	Tx 送信出力 (dBm)	10
Tx 内損失 (dB)	2	Tx 内損失 (dB)	2
Tx アンテナ利得 (dB)	-3	Tx アンテナ利得 (dB)	-3
Tx アンテナ高 (m)	1.5	Tx アンテナ高 (m)	1.5
Rx 内損失 (dB)	2	Rx 内損失 (dB)	2
Rx アンテナ利得 (dB)	-3	Rx アンテナ利得 (dB)	-3
Rx アンテナ高 (m)	1.5	Rx アンテナ高 (m)	1.5

また、各周波数帯における Rx の感度をそれぞれ表 4-4-14、4-4-15 のように設定した。

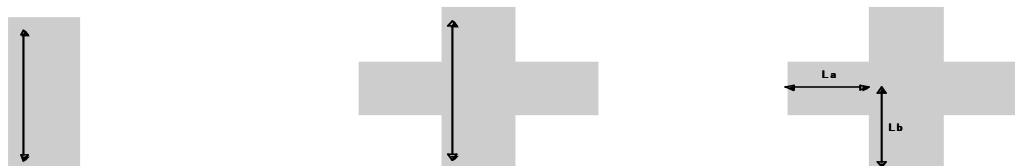
表 4-4-14 5.8GHz 帯 Rx の受信感度

項目	値	備考
周波数 (MHz)	5800	
変調方式	QPSK	
伝送帯域幅 (kHz)	1000	
情報伝送速度 (kbps)	800	通信車両数 100 台、通信周期 100ms、データパケット長 100Byte として算出した
BER	1×10^{-5}	情報伝送に必要なビット誤り率
所要 C/N (dB)	14	BER 曲線から上記 BER を実現するのに必要な理論値を求める
装置化マージン (dB)	2	装置化した際に見込まれる上記所要 C/N に対するマージン
受信機の所要 C/N (dB)	16	所要 C/N と装置化マージンの和
受信機雑音指数 NF (dB)	10	初段のローノイズアンプの近年の性能値
受信機雑音電力 N (dBm)	-103.8	Rx 自身が発生する雑音電力 ($k \times T \times B \times NF$) K: ボルツマン係数、T: 温度、B: 雑音帯域幅
外来雑音電力 (dBm)	-133.6	$-228.6 + 10 \log(T) + 10 \log(\text{伝送帯域幅}) + NF + 30$ T: 都市部の雑音温度 (ITU1982 より)
全受信雑音電力 N (dBm)	-103.8	受信機雑音電力と外来雑音電力の和
受信感度 (dBm)	-87.8	全受信機雑音電力と受信機の所要 C/N の差

表 4-4-15 2.4GHz 帯 Rx の受信感度

項目	値	備考
周波数 (MHz)	2400	
変調方式	QPSK	
伝送帯域幅 (kHz)	1000	
情報伝送速度 (kbps)	800	通信車両数 100 台、通信周期 100ms、データパケット長 100Byte として算出した
BER	1x10E-5	情報伝送に必要なビット誤り率
所要 C/N (dB)	14	BER 曲線から上記 BER を実現するのに必要な理論値を求める
装置化マージン (dB)	2	装置化した際に見込まれる上記所要 C/N に対するマージン
受信機の所要 C/N (dB)	16	所要 C/N と装置化マージンの和
受信機雑音指数 NF (dB)	8	初段のローノイズアンプの近年の性能値
受信機雑音電力 N (dBm)	-101.8	Rx 自身が発生する雑音電力 ($k \times T \times B \times NF$) K: ボルツマン係数、T: 温度、B: 雑音帯域幅
外来雑音電力 (dBm)	-120.6	$-228.6 + 10 \log(T) + 10 \log(\text{伝送帯域幅}) + NF + 30$ T: 都市部の雑音温度 (ITU1982 より)
全受信雑音電力 N (dBm)	-101.7	受信機雑音電力と外来雑音電力の和
受信感度 (dBm)	-85.7	全受信機雑音電力と受信機の所要 C/N の差

交差点を除き道路の両側には、高さ 15m のコンクリートブロックが 1km に渡って存在するモデルとしている。また、右折事故モデルおよび出会い頭事故モデルの場合には、交差点中央に右折停止中のトラック（スチール材質の直方体）が存在することを想定したフィールドモデルに対しても計算を行い、以下の結果を得ることができた。



5.8GHz帯通信可能エリア
180m
2.4GHz帯通信可能エリア
220m

5.8GHz帯通信可能エリア
60m
2.4GHz帯通信可能エリア
120m

5.8GHz帯通信可能エリア
La=10m、Lb=13m
2.4GHz帯通信可能エリア
La=10m、Lb=23m

図 4-4-4 道路形状と周波数帯毎の電波到達距離

パケット中継方式に関する検討

以上の結果から、通信システムに要求される通信範囲を直接通信によって実現することが困難であることが分かった。したがって、必要通信範囲を実現するためには、マルチホップによってパケットを中継する必要がある。そこで、算出した通信可能エリアと必要通信範囲から、車車間通信を実現する上でどの程度のホップ数が必要となるかを算出した。

交差点を挟んで直線上に存在する対象車両と通信を行うためには、5.4GHz 帯では、最低 4 ホップ必要となる。2.4GHz 帯では、最低 2 ホップである。(図 4-4-5 参照)

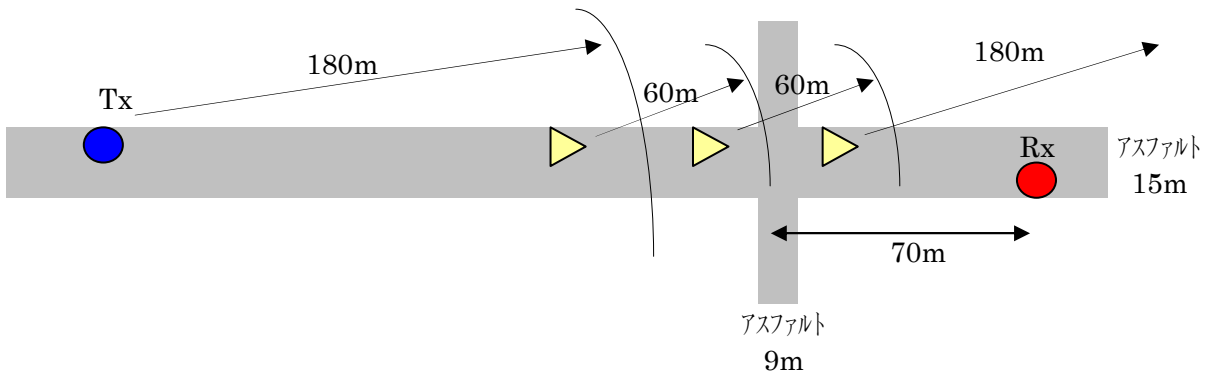


図 4-4-5 交差点を挟んだときのパケット中継と必要ノード数

出会い頭事故の場合は、下図に示した様にどの帯域においても3ホップ必要である。ただし、5.8GHz帯では、交差点手前10m以内、交差点左13m以内に中継ノードが必要となり、2.4GHz帯では、交差点手前10m以内、交差点左23m以内に中継ノードが必要となる。

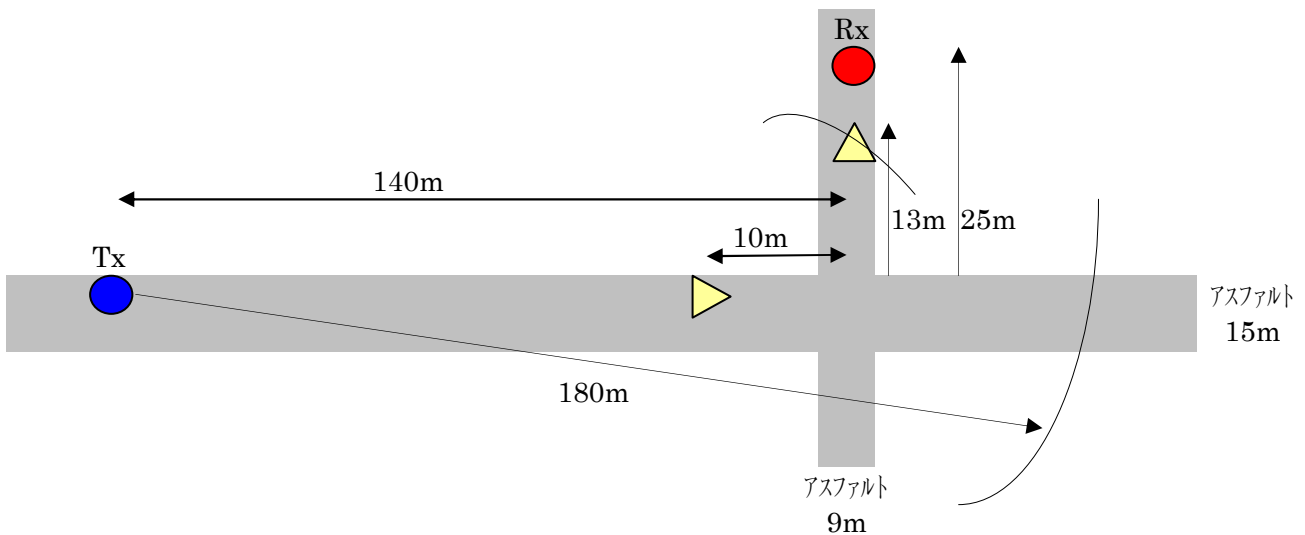


図 4-4-6 交差点左側へのパケット中継と必要ノード数

以上から、車車間通信を実現するためには、使用周波数帯に関わらずマルチホップ通信が必要であることが分かった。マルチホップ通信の形態には、フラッドディング、ユニキャスト、マルチキャストの3種類が考えられる。車車間通信では、車両の移動速度、許容される通信遅延の小ささ、通信相手が周辺の不特定多数の車両であること等を考慮すると、通信ルートの構築を必要とする通信手法は有効でないと考えられる。このことから、車車間通信におけるパケット中継方式としては、フラッドディングが最適であると考えた。しかし、フラッドディングは、車両の密度や使用するフラッドディングアルゴリズムによる影響を受けやすい。そこで、フラッドディングアルゴリズムと車車間通信への適用可能性について検討を行った(表 4-4-16 参照)。

表 4-4-16 フラッディングアルゴリズムと車車間通信への適用可能性

	Simple Flooding	Neighbor elimination based	Probabilistic based	Location based
特徴	高いモビリティにも対応できるが、ブロードキャストストームが問題	Neighbor リストから得られる情報をもとに、パケット転送ノードを決定することで、転送可能ノードの数を制限する。	確率によってパケット転送ノードを決定することで、転送可能ノードの数を制限する。	位置情報をもとにパケット転送ノードを決定することで、転送可能ノードの数を制限する。
車車間通信への適用性	ブロードキャストストームの問題を解決する必要があるが、それが解決できれば、適用可能性がある。AODVで行っているようなTTLの制御はある程度有効と考えられる。	フラッディング可能なノードを制限するという考え方は適用できる可能性がある。ただし Neighbor リストから情報を得るという方法は適用可能性が低い	フラッディング可能なノードを制限するという考え方は適用できる可能性がある。ただし常に一定の確率分布を使用するのは事故防止にあまり有効ではないと考えられる。位置情報や速度情報等、車の状況に応じて確率分布を変化させることで有効となる可能性はあると考えられる。	フラッディング可能なノードを制限するという考え方は適用できる可能性がある。ただし、Neighbor (の位置情報) を管理するという方法ではなく、データパケットに載せられた位置情報と自身の位置情報を比較するという方法をとることになると考えられる。

表 4-4-16 から、パケットを中継する車両を適切に選択することが重要であると考えられ、中継車両の選択には TTL と位置情報が有効であるという結論を得た。位置情報に関しては、電波強度を用いる手法、GPS 等の位置測定機能を利用する手法が考えられる。前者は、精度が低く、後者は周辺建物などの状況により使用不可であるため、これらを必要に応じて切り替える等の手法が必要であるという結論を得た。また、フラッディングには、通信リソースの消費量が大きいという問題がある。一般的には、車両の速度と密度には相関関係があると考えられる。そこで、これらの関係を用いて通信周期を変更することにより、問題が解決可能であるとの結論を得た。

4-4-5 クロスレイヤアーキテクチャの検討

高レスポンス性要求に対して効果的な要素技術の性能を十分に引き出すためのアーキテクチャとして、クロスレイヤアーキテクチャが重要な開発課題である。中継パケット高速転送技術は、それ自体が物理レイヤ、MAC レイヤ及びネットワークレイヤにまたがるクロスレイヤ処理といえる。図 4-4-7 に示すように、以下の処理を実行することにより遅延の最小化を図ることが可能である。

- ① 物理レイヤは各チャンネルの干渉量や回線品質の情報を MAC レイヤに提供する。
- ② 上記①の情報に基づいて、MAC レイヤは適切なチャンネル選択に関する情報を物理レイヤに提供する。
- ③ 処理遅延を最小にするために、経路制御は従来のネットワークレイヤを経由せずに MAC レイヤでラベルスイッチにより行うが、スイッチの設定はネットワークレイヤのルーティング処理と連携して行う。
- ④ 下位レイヤは上位レイヤに回線品質に関する情報を提供し、上位レイヤはその情報に基づいて、パケットロスと再送が原因となって発生するパケット遅延を最小にするための経路選択および転送レートの制御を行う。

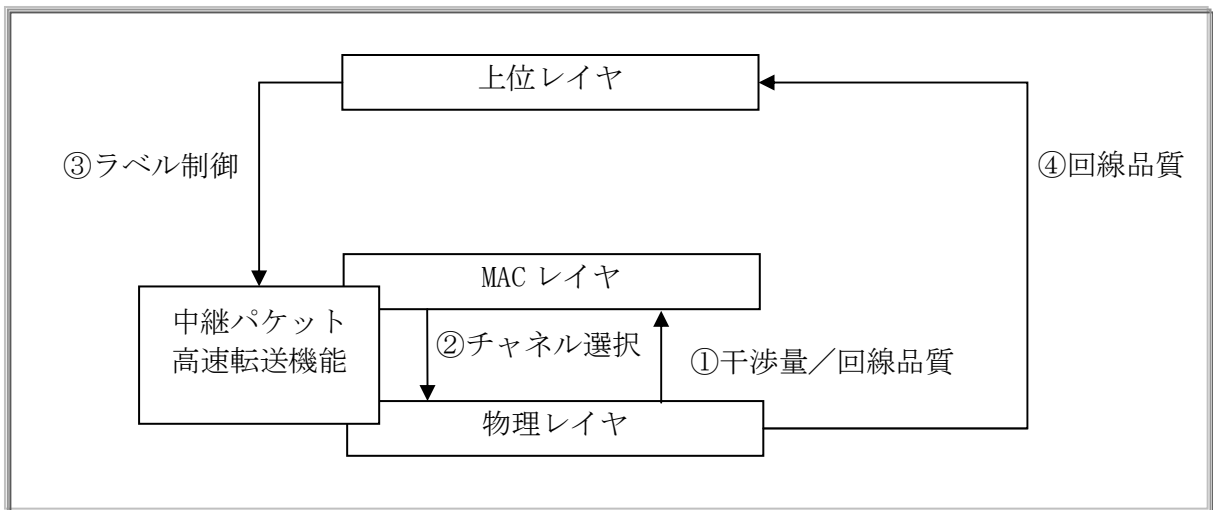


図 4-4-7 主なクロスレイヤ情報交換

上記のような各クロスレイヤ処理を効率よく行うためには、従来とは異なるアーキテクチャ・制御方式を開発する必要がある。つまり、クロスレイヤ・アーキテクチャは、任意レイヤ間での情報交換・処理を可能にする必要がある。図 4-4-8 において、クロスレイヤ情報交換・処理を提供するクロスレイヤアーキテクチャを示す。図に示すクロスレイヤ・アーキテクチャはクロスレイヤ管理部をもち、このクロスレイヤ管理部がレイヤをまたいだ情報交換、処理を提供する。従って、図 4-4-4-X2 で示すクロスレイヤアーキテクチャは、プロトコルの拡張性を確保しながら、任意のレイヤ間で情報をすばやく有機的に結び付けて、クロスレイヤ処理に総合的に対応できる特長を持つ。

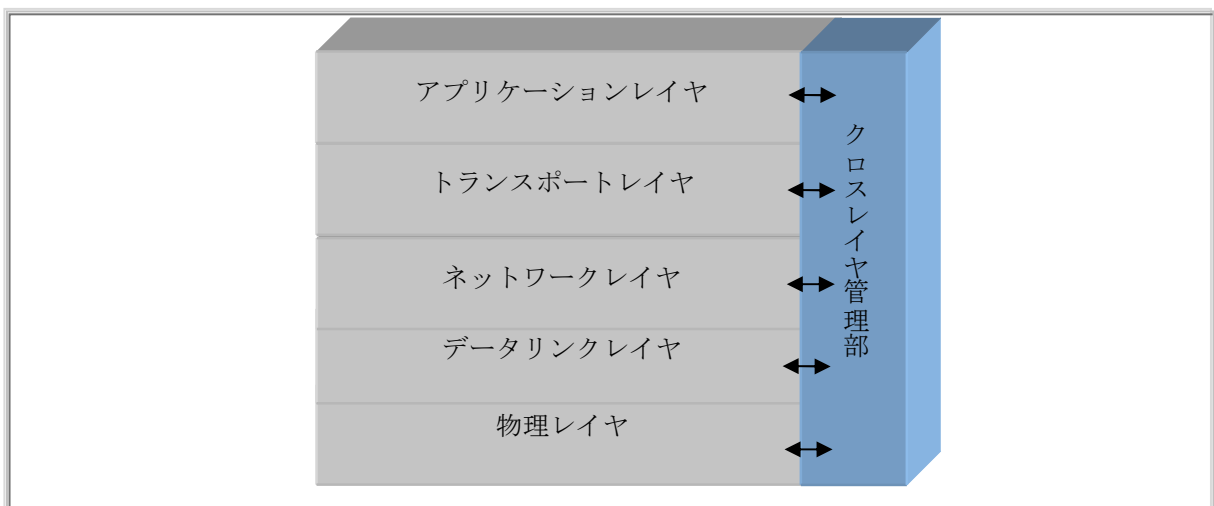


図 4-4-8 クロスレイヤアーキテクチャ

シミュレーション評価

図 4-4-4-8 で示すクロスレイヤアーキテクチャに基づいた、クロスレイヤ処理の性能評価をネットワークシミュレータ NS-2 により行った。シミュレーションで対象にしたクロスレイヤ処理は、図 4-4-7 の④で示す下位レイヤが回線品質に関する情報を上位レイヤに提

供し、上位レイヤは回線品質に応じて転送レートを制御するものである。具体的には、シミュレーションでは、車車間通信のようなリアルタイム性の高いトラフィック(以降、リアルタイム性トラフィック)を送信する端末を想定し、送信端末が無線チャネルの状態に適したレートでトラフィックを送信するクロスレイヤ処理を行った。そのためには、送信端末のクロスレイヤ管理部は、無線チャネルの混み具合に関する情報を、下位レイヤから定期的を取得し、その情報に基づき、アプリケーションレイヤに対してレート制御を指示する。今回は MAC802.11 を使用したため、無線チャネルが混むと無線端末のバッファが輻輳状態になるため、バッファの状態を無線チャネルの混み具合を表す指標として使用した。具体的には、クロスレイヤ管理部はデータリンクレイヤからキュー長の情報を 1 秒毎に受け取る。そして、キュー長がある閾値 Th_{min} より小さい場合、無線チャネルが空いていると判断し、アプリケーションに対して送信レートを ΔR 分上げることがを指示する。一方キュー長が閾値 Th_{max} より大きい場合、無線チャネルが混んでいると判断し、送信レートを ΔR 分下げることがを指示する。キュー長が Th_{min} より大きく、 Th_{max} より小さい場合は、送信レートが適当であると判断し、アプリケーションに対してレート制御の指示を行わない。クロスレイヤ管理部からレート制御の指示を受けたアプリケーションは指示に従ってリアルタイム性トラフィックの送信レートを制御する。シミュレーションに用いた各パラメータは以下である。

● シミュレーション実行時間	200 s
● 無線端末の数	30 台
● アンテナ	Omnidirectional
● 無線伝搬モデル	Free space & Two-ray
● 通信範囲	220 m
● MAC プロトコル	IEEE 802.11b
● 無線リンク帯域	2 [Mbps]
● リアルタイム性トラフィックの最大転送レート	200 kbps
● リアルタイム性トラフィックの packet サイズ	200 bytes
● バックグラウンドトラフィックの packet サイズ	200 bytes
● バックグラウンドトラフィックの送信間隔	0.01 s
● Th_{min}	400 bytes
● Th_{max}	1000 bytes
● ΔR	8 kbps

シミュレーションは、交差点の一角を想定し、30 台の端末がお互いの通信範囲に位置するシナリオを設定した。2 台の端末の間にクロスレイヤ処理の対象とするリアルタイム性トラフィックが送受信され、その他の 28 台の端末は、無線チャネルの混み具合を変化させるためのバックグラウンド・トラフィックの送信用に設置した。バックグラウンドトラフィックを含め、全ての通信は 1 ホップの通信である。シミュレーションにおいて、最初に (0 秒に) リアルタイム性トラフィックの通信が開始される。バックグラウンドトラフィックはリアルタイム性トラフィックの通信が開始後、5 秒おきに追加される。全てのトラフィックの通信は、リアルタイム性トラフィックの通信の開始から 200 秒後に同時刻で終了する。

クロスレイヤ処理の性能評価として、リアルタイム性トラフィックにおいて最も重要なパラメータである到達率と遅延を比較した。図 4-4-9 と図 4-4-10 はシミュレーションの結果であり、横軸にバックグラウンド負荷を、縦軸は到達率と遅延を表す。バックグラウンド負荷は 5 秒おきに増加されるため、図 4-4-9 と図 4-4-10 の横軸は 5 秒刻みの時間軸と一致し、対応する到達率と遅延は 5 秒間の到達率と遅延を表す。各図におけるクロスレイヤ処理の到達率および遅延の値のばらつきは、クロスレイヤ処理に伴って数秒毎に行われるレート制御によるものである。図 4-4-9 から分かるように、従来方式(クロスレイヤ処理がない)において、バックグラウンド負荷の増加につれてリアルタイム性

トラフィックの到達率が著しく悪化する。一方、クロスレイヤ処理がある場合は、チャネルの混み具合に適したレートでリアルタイム性トラフィックが送信されるため、伝達率は 90%を超える高い値を得る。また、図 4-4-10 から、従来方式に比べ、クロスレイヤ処理がある場合にリアルタイム性トラフィックの遅延が著しく抑制されることが明らかになった。

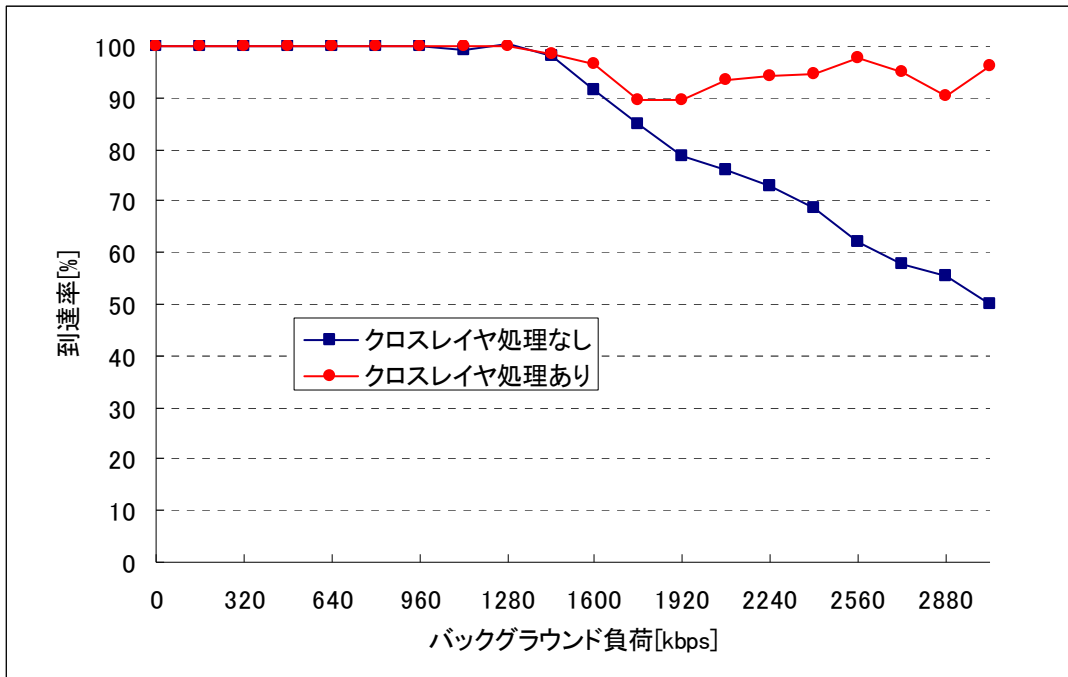


図 4-4-9 リアルタイム性の高いトラフィックの packet 到達率の比較

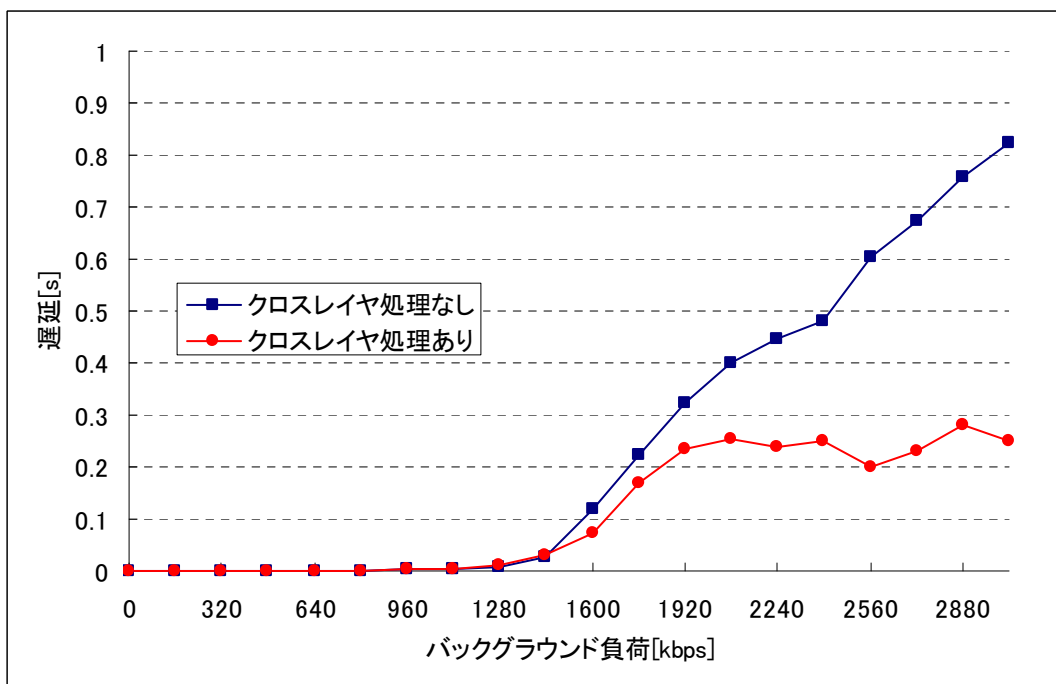


図 4-4-10 リアルタイム性の高いトラフィックの packet 遅延の比較

4-4-6 達成状況

本年度は、対象アプリケーションとして車車間通信を想定し、交通事故データの解析を行った。この結果から、求められる通信性能を明らかにし、今後シミュレーションを行っていく上で必要となる各種パラメータを明らかにした。また、今回得られたパラメータに基づくクロスレイヤアーキテクチャに関する基礎的なシミュレーションを行い、クロスレイヤアーキテクチャを採用することによる優位性について確認した。しかし、インタフェース形態の概念設計に関しては、部分的な検討に留まった。

以上より、今年度計画に対し、達成度は95%程度と考える。

来年度は、今年度の未検討課題を早急に検討し、かつ、クロスレイヤアーキテクチャに関するより詳細なシミュレーション及び設計を行っていく予定である。また、サブテーマ「中継パケット高速転送技術の研究開発」と連携して、従来の手法よりも効率的かつ車車間通信に適用可能なフラッディングアルゴリズムの検討を行う予定である。

4-5 総括

今年度は、本研究開発の初年度であり、実施機関は平成17年12月から4ヶ月間であった。今年度はチャンネル構成技術の研究開発、チャンネル制御技術の研究開発、中継パケット高速転送技術の研究開発の3つのサブテーマに関しては、各要素技術の基本的な方式検討と基礎的な性能評価を実施し、当初計画の100%を達成した。アーキテクチャとシステム化技術の研究開発に関しては、システム設計検討の基礎となるアプリケーション要求に基づいた通信モデルの検討と、クロスレイヤアーキテクチャに関する概念検討と基礎的な性能評価を実施したが、インタフェース形態については部分的な検討に留まり、95%の達成度と判断する。以上のように全体としては、ほぼ100%の達成度であり、次年度早期にスケジュールの回復が可能な状態にある。

5 参考資料・参考文献

5-1 研究発表・講演等一覧

研究発表、講演、文献の状況

決裁番号	発表方法	雑誌名・国際会議名	発表者	タイトル	発表(予定)日	査読	状況
2005 適一発 050	その他	バイオコミュニケーション国際シンポジウム2006、分子通信テクノロジー国際シンポジウム	Peter Davis	Self-Organizing Multi-hop Communication Mechanisms	2006/1/19 ~2006/1/20	有	発表済
2005 適一発 064	国際会議	The 17th Annual IEEE International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'06)	Satoko Itaya, Jun Hasegawa, Peter Davis, Naoto Kadowaki, Sadao Obana	Low-latency, low-packet loss communication for real-time interaction over wireless mesh networks	2006/9/11 ~2006/9/14	有	査読中