

## 高度 VHF 帯自営無線のための 自律分散型マルチホップ通信端末の開発

児島史秀<sup>†</sup> 菅田明則<sup>†</sup> 藤瀬雅行<sup>†</sup> 大山卓<sup>††</sup> 清水聡<sup>††</sup> 徳田清仁<sup>††</sup>

<sup>†</sup>独立行政法人情報通信研究機構 <sup>††</sup>沖電気工業株式会社

本稿では、VHF 帯等を用いる自営無線のための、自律分散型マルチホップ通信アルゴリズムを提案する。提案アルゴリズムでは、各端末が他端末からの受信電力を測定し、それに基づいて自律分散的に端末グループと呼ぶサブネットワークを構成する。同時に各端末は本グループに応じて経路選択テーブルを作成することで、動的な端末間パケット中継通信を行い、端末同士のスループットを改善する。さらに本稿では、本アルゴリズムを実装する無線通信端末の試作機について説明し、取得した基本的な特性ならびに効果を報告する。

### Autonomous Multi-Hop Communication Terminal for Advanced Customer-Provided Mobile Communications

Fumihide Kojima<sup>†</sup>, Akinori Sugata<sup>†</sup>, Masayuki Fujise<sup>†</sup>,  
Takashi Ohyama<sup>††</sup>, Satoru Shimizu<sup>††</sup>, and Kiyohito Tokuda<sup>††</sup>

<sup>†</sup>National Institute of Information and Communications Technology (NICT), IAI

<sup>††</sup>Oki Electric Industry Co., Ltd.

This paper proposes an autonomous multi-hop communication algorithm for customer-provided mobile communications system assuming VHF-band radio transmission. According to the proposed algorithm, each mobile terminal autonomously constructs sub-network topology named terminal-group, based on the received power from other terminals. Each terminal also generates its own routing-table due to such topology, and conducts dynamic packet relay transmission, thereby improves throughput of packet transmission. We further introduce our prototype terminal for such an algorithm and reports about fundamental performance of the throughput than that without the packet routing algorithm.

#### 1 はじめに

VHF 帯等を用いる自営用移動通信システムは、昨今より実用化がなされた市町村デジタル移動通信システム「ARIB-STD T-79」に代表されるように防災行政無線としても非常に重要な用途に割り当てられている[1]。本周波数帯運用の特質上、現状のシステムでは信号の周波数帯域幅は極めて狭く設定されており、結果として音声伝送が主たるサービスの実態となっている。さらに、通信のトポロ

ジとしても、固定基地局を前提とした中継通信が支配的となっている。一方で、防災行政無線の見地からは、動画像伝送等の高度なサービスの実現は切実に望まれている。

情報通信研究機構では、このような自営用移動無線システムの高度化という観点から、具体的には以下のような要素技術の導入について検討を続けている。ひとつは高度変調方式の適用による伝送品質の向上であり、もうひとつは、端末同士

の自律分散型マルチホップ通信によるスループットの改善である。前者については、広帯域伝送による伝送速度の向上や、OFDM 等の技術による耐マルチパス性の確立が想定される。一方後者については、状況に応じて端末同士で行われる動的なマルチホップ通信アルゴリズムの導入が考えられる。特に後者の技術は、従来の固定基地局・中継局の存在を必要としない運用形態を示唆しており、これらの固定設備の機能が損なわれた災害地において、移動端末のみによる救援活動支援等に有効性が予想される。このような、動的マルチホップ通信アルゴリズムに関する検討は、室内環境における無線 LAN を用いるシステム等に関してこれまで多く為されている。しかしながら VHF 帯等の運用形態に関しては、信号帯域、電波伝搬距離、さらに伝搬路状況の変動の程度等が上記システムとは大きく異なることが予想されるのにも関わらず、同等の検討がほとんど検討されていないのが現状である[2][3]。

以上のことから本稿では、高度化のための二つの要素技術のうち、特に動的マルチホップ通信技術について、各端末が他端末からの受信電力を測定しながら中継テーブルを作成し、比較的ホップ数の少ない自律分散型パケットルーティングを実現するためのアルゴリズムについて提案し、計算機シミュレーションによる評価を行う。さらに、本技術の実装を目的として開発した試験装置について述べ、本試験装置を用いて取得した基本特性を説明しながら、提案する動的マルチホップ通信技術の有効性について述べる。

## 2 システム構成

### 2.1 基本原理

図1に提案する自律分散型パケットルーティングの基本原理を示す。考察の対象とするのは、図のように、複数の移動端末が散在する中で、ある端末から別の端末にパケットを効率よく届ける状況である。ここで、図1にあるように、特定の2端末間で比較的伝搬路状況が良好なパス（Preferable Path）の存在がわかっているとすると、このとき、Preferable Path のみで端末同士が結ばれたサブネットワークが存在し、かつ以上の宛先端末がこのサブネットワークに含まれていた場合には、本サブネットワーク内の適当な端末にパケットを届けるこ

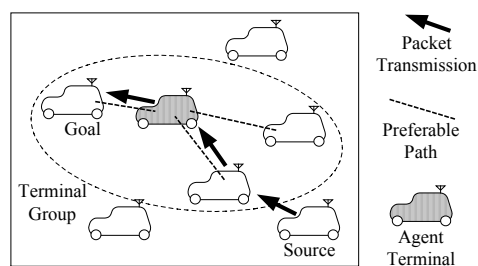


図1 基本原理。

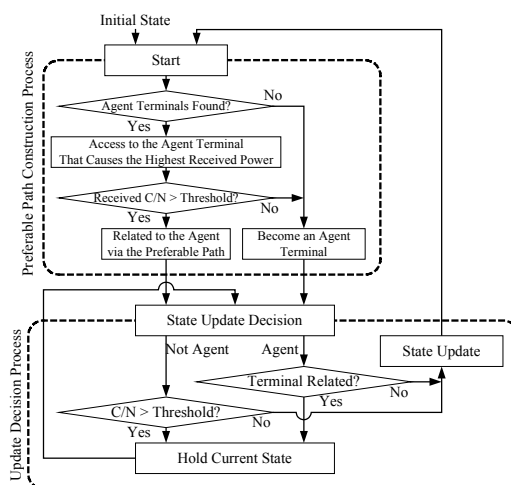


図2 端末グループ構成アルゴリズム。

とで、その後は Preferable Path を経由して比較的確実に宛先までパケットを中継することが可能である。さらに本検討では、より制御を簡単にするために、以上のサブネットワークグループは、周囲状況に応じて選ばれる Agent 端末を中心とする、スター状のネットワークであるとし、これを端末グループと呼ぶ。すなわち、端末グループは、ひとつの Agent 端末と、それに Preferable Path を介して論理的に従属する 0 個以上の Non-Agent 端末で構成される。

### 2.2 端末グループ構成アルゴリズム

端末グループは、周囲状況に応じて動的に構成され、かつ逐次更新されるものである。このことは各端末が、自律分散的に Agent、あるいは Non-Agent という動作モードを決定することに等しい。図2に、端末グループ構成のためのアルゴリ

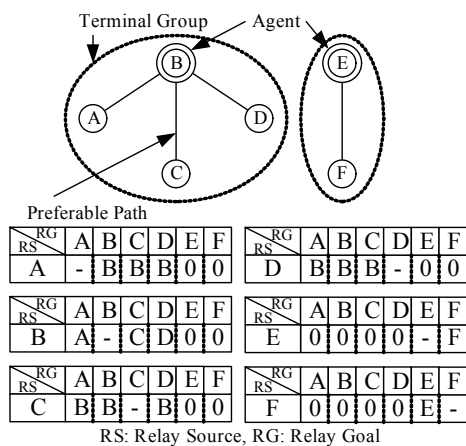


図3 各端末の中継テーブル.

ズムを示す[4]. まず動作モードを決定する端末は, Agent 端末が近くに存在するかを検知する. 周囲に端末が存在しない場合には, 自ら Agent 端末となる. 対して 1 個以上の Agent 端末が検知された場合, 最も高い受信電力が得られる Agent 端末について, 得られた CN 比とあらかじめ設定されたスレッシュド値を比較する. CN 比がスレッシュドを上回った場合, 端末の動作モードを Non-Agent と決定し, その Agent 端末に対して従属する. 対して下回った場合には, 自ら Agent 端末となる. ここで, 設定された CN 比のスレッシュドとは, 本アルゴリズムの 1 パラメータであり, 値を  $CN_{agent}$  と表記する. 以上により決定された各動作モードは一定時間ごとに更新条件に照らされた後, 必要ならば更新される. Non-Agent 端末では, 従属する Agent 端末からの受信電力が  $CN_{agent}$  を下回った場合に, また Agent 端末ではそれに従属する Non-Agent 端末数が 0 となった場合にそれぞれ動作モードをリセットし, 新たに動作モードを決定する.

### 2.3 動的ルーティングの動作

前節のアルゴリズムによって, 論理的なトポロジである端末グループが決定された場合, 以下のような簡単なルールを定めることで, 想定する自律分散型パケットルーティングが実行される. すなわち, 自分宛でないパケットを受け取った場合にそれぞれ, Agent 端末は宛先端末に対して直接パケットを中継し, Non-Agent 端末は, 自分の従属する Agent 端末に対してパケットを中継する. 具

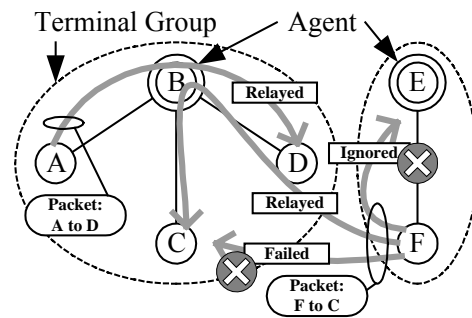


図4 動的パケットルーティングの例.

体的には, 端末グループのトポロジに従い, 各端末が独自のパケット中継テーブルを所持すればよい. 図3に, ある端末グループ構成に対する, 各端末のテーブルを示す. テーブルは, パケットを発生させた端末, および自分宛でないパケットを受け取った各端末(RS)が, そのパケットを次にどの端末(RG)に中継するべきかを規定するものである. ここで, 中継先が 0 となっているのは, 端末への中継経路が明確でないことを表している. この場合, そのパケットが自分自身のものであった場合(すなわち, パケット発信元であった場合には, ブロードキャストを行うが, そうでない場合には, パケットを棄却する.

図4に, 以上に基づく自律分散型マルチホップ通信の動作例を示す. 図3と同じトポロジにおいて, 端末AはD宛に, FはC宛にそれぞれパケットを発生させている. 前者のパケットはAのテーブルに基づいてまずBに中継され, さらにBのテーブルによってDに送られる. 後者のパケットは, 中継先が0のケースに相当する. Fは発信元であるため, パケットをブロードキャストする. 本パケットは伝搬距離による減衰のためDとEにのみ到達するが, 中継端末であるEのテーブルの宛先Dにはやはり0が表記されているため, Eにてパケットは棄却される. 一方で, DのテーブルにはCへの0でない経路が記載されているため, これに従ってBを経てCまでパケットは中継される.

## 3 計算機シミュレーションによる評価

### 3.1 シミュレーション諸元

表 1 計算機シミュレーション諸元.

伝搬定数	3.5
シャドウイング	標準偏差 6.5 dB の対数正規分布
パケット到着	ポアソン到着
シミュレーション エリア	4L*4L の正方形
端末数	50 端末
端末の配置	一様分布
$CN_{agent}$	20 dB
$CN_{th}$	20 dB
パケット再送	3 スロット以内
パケットタイムアウト	10 スロット

提案アルゴリズムの有効性について考察するため、計算機シミュレーションによる評価を行った。表 1 に諸元を示す。伝搬路状況として、伝搬定数 3.5 の距離減衰と、標準偏差 6.5 dB の対数正規分布に従うシャドウイングを考慮する。トラヒックモデルとして、各端末独立にパケットがポアソン到着に従って発生する状況を仮定し、Slotted-ALOHA 型のアクセス方式を実現させた。ただし、電力干渉によるパケット衝突は発生しないとした。端末グループ構成の際に必要な CN 比スレッシュホールド、ならびにパケットが成功裏に受信可能な受信 CN 比をとともに 20dB と設定する。これは、適切な畳み込み符号化ならびにインターリーブを行った結果、フェージング環境下において BER=1e-6 相当の伝送品質を確立するために必要とされる値として採用した[5]。

### 3.2 スループット特性

図 5 に、計算機シミュレーションによって得られたスループット特性を示す。比較として、提案するパケット中継を行わず、すべて直接通信を用いる場合の特性も併せて示す。パラメータとして、各端末の送信電力を用いた(ただし、図中では受信電力によって規定している)。電力が十分高い領域では、端末間距離が離れた端末に対しても直接通信によって十分パケットを到達させることができるため、2 方式の特性に差はなく、かつスループットもほぼ 1 であるが、電力が低くなるにつれて、特

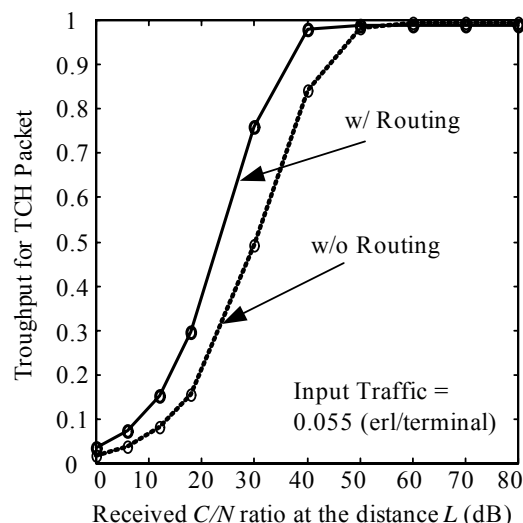


図 5 スループット特性.

性は劣化している。しかし、パケット中継を用いる提案方式では、送信電力が低い状況下においても、Preferable Path を利用し、かつ中継によってパケットの到達範囲を格段に改善することが可能であるため、中継を行わない方式に比べて高いスループットを確立していることが確認できる。

## 4 試作機による評価

### 4.1 試作機概要

屋外環境を含む、実運用環境に近い運用形態における、提案アルゴリズムの効果について実証するため、情報通信研究機構では、試作機を開発している。本節以降では、この試作機について述べるとともに、これを用いて行った基本特性取得試験の結果を報告する。図 6 に試作機の外観を、さらに表 2 に本試作機の諸元をそれぞれ示す。試作機は、最も長い一辺が約 30cm であり、車両等に搭載しての屋外試験が容易なように小型化が為されている。同時に、使用周波数帯、変調方式、アクセス方式に関して複数方式を切り替えながら運用することができ、実装環境をパラメータとした提案アルゴリズムの効用について評価することができる。さらに、本試作機は、アプリケーションとして、IP を実現することが可能であるため、現在普及している IP 機器(例えばノート PC)を接続することで、FTP や HTTP のようなプロトコルを実施した上で QOS 評価等も行われる構成となっている。



図 6 試作機外観.

表 2 試作機諸元.

送信電力	3W
周波数帯	150, 260, 400 MHz
最大伝送速度	256kbps
占有帯域幅	300kHz
変調方式	DBPSK, DQPSK, $\pi/4$ -DQPSK
アクセス方式	Slotted-ALOHA, CSMA
装置寸法(本体)	12×30×20 (高さ×横幅×奥行) cm

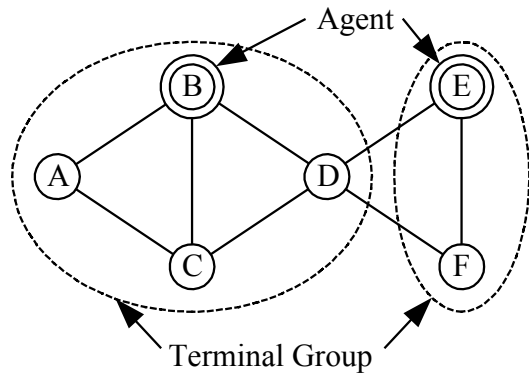


図 7 評価試験の前提.

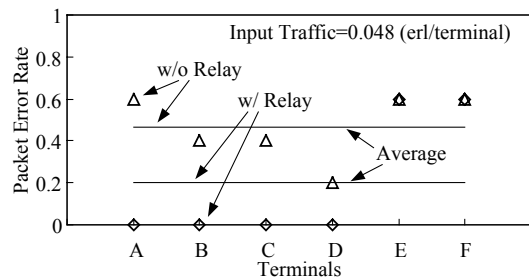


図 8 パケット誤り率特性

#### 4.2 評価試験の前提

本稿では、特に基本的な特性について評価することを目的として、図 7 のような 6 端末の配置を想定し、室内における有線試験を行った結果について述べる。端末間の伝搬路状況は、任意の 2 端末間の伝搬路状況を独立に設定できる治具(擬似無線伝搬路)にて BER を与えることにより実装する。評価試験においては、図 7 のうち、実線で結ばれた端末間では BER は  $1e-04$  とした。この値は別途取得した電波伝搬特性より得られたもので、260MHz 帯で  $\pi/4$ -DQPSK 伝送を用い、端末間距離が 1km 程度の状況に相当する。それ以外の端末間では、BER は 0.5 とした。トラヒックとして、各端末で他端末のいずれかにランダムでパケットを発生させるポアソンモデルを導入した。さらに、各端末の中継テーブルについては、図 3 におい

て示したものをあらかじめ設定した上で、パケット伝送試験を行った。

#### 4.3 パケット誤り率特性

図 9 に評価試験によって得られたパケット誤り率特性を示す。図では、各端末が発生させたパケットについてそれぞれのパケット誤り率と、さらに 6 端末の平均特性について示した。さらに、第 3 節における評価と同様に、パケットの中継を行わない方式の特性についても同様に示した。図より、提案する中継を行う形態は、中継によってパケットの到達距離を拡大することが可能であるため、各端末、システム全体の特性ともにパケット誤り率が改善されていることがわかった。

## 5 おわりに

本稿では、VHF 帯等を用いる自営用移動無線システムへの適用を前提として、移動端末同士が無線伝搬路環境の変動に柔軟に対応するため、各端末が他端末からの受信電力をパラメータとして自律分散的にパケットルーティングを実現する動的マルチホップ通信アルゴリズムを提案し、諸特性について報告した。計算機シミュレーションによる考察、ならびに試作機を用いた評価試験のいずれにおいても、提案アルゴリズムによるパケットルーティングの効果を確認することができた。今後の課題として、屋外電波発射試験等、より実運用環境に近い条件下における評価、ならびに動的な端末グループ構成機能に関する詳細評価等が挙げられる。

## 参 考 文 献

- [1] ARIB STD T-79.
- [2] K. Ishida, Y. Kakuda, T. Kikuno, and K. Amano, "Distributed Routing Protocol for Finding Two Node-Disjoint Paths in Computer Networks", IEICE Trans., Commun., Vol. E82-B, No. 6, pp. 851-858, June 1999.
- [3] Y. Zhang and S. Asano, "Routing Algorithm for Asymmetric Multi-Destination Connections in Multiclustler Networks", IEICE Trans., Commun., Vol. E81-B, No. 8, pp. 1582-1589, August 1998.
- [4] F. Kojima, H. Harada, and M. Fujise, "An Autonomous Relay Access Scheme for an Inter-Vehicle Communication Network", Proc. of IEEE PIMRC2000, pp. 974-978, September 2000.
- [5] S. Sampei, "APPLICATIONS of DIGITAL WIRELESS TECHNOLOGIES to GLOBAL WIRELESS COMMUNICATIONS," Feher / Prentice Hall, NJ, 1997.