# 分散型無線ネットワークのための階層型ルーティング方式の提案と評価

Proposal of A Layered Routing Algorithm for
Destributed Wireless Networks And Its Performance

† 開発 和典　† 白河 芳徳　† 太田 能　† 森井昌克　‡ 真野浩
†Kazunori Kaihotsu　†Yoshinori Shirakawa　†Chikara Ohta　†Masakatu Morii　‡ Hiroshi Mano

† 徳島大学　‡ ルート株式会社
†University of Tokushima　‡Root Inc.

## 1　はじめに

近年，スペクトラム拡散などの無線技術の進歩により，低電力で高い伝送品質を実現できる無線リンクが低価格で実現できるようになった．このような背景から，小電力無線機に中継機能を持たせ，地理的に分散配置し，広範囲を無線によりカバーする小電力分散型無線ネットワークの実現が可能になった．

分散型無線ネットワークは，通信経路に冗長性を有することから耐障害性が高く，全ノード間で無線リンクが直接保たれていなくてもパケット中継機能により相互通信を可能である．また，中継機能を有していることから小電力無線機を用いても広範囲にわたるネットワークを構築できるなどの優れた特徴を有している [1]．

分散型無線ネットワークでは中継機能が必須である．しかしながら，無線伝送路における通信品質は，天候や障害物の移動などにより，時間的に変動し，ノード間で双方向リンクを設定できない場合がある．また，無線装置の能力差からリンク容量がもともと異なる場合も想定される[1]．このような無線伝送路の特徴を考慮した分散型無線ネットワーク用ルーティング方式として APFS (Asymmetric Path Finding System) が提案されている [1]．

APFS では，無線路では電波伝搬距離内のノードに同報できるという特徴を利用したフラッディングを行うことにより，各ノードがモニタした回線品質情報をネットワーク全体に伝達する．各ノードは，これを経路情報として用いることで，通信品質の良い経路を選択することができる．

しかしながら，ノード数の増加に伴い，回線品質テーブルのサイズは大きくなり，この交換に用いられる制御パケット量が増大する．これは，データパケットが利用できるネットワーク容量を減少させることになり，データパケットのスループットが低下することが予想される．

本研究では，このような問題点を解決する方法として，分散型無線ネットワーク用グループ化階層ルーティング方式 (GLRDWN: Grouped Layered Routing for Destributed Wireless Networks) を提案し，その有効性を明らかにする．以下，**2.** では，GLRDWN を提案する．**3.** では，提案方式の有効性を確認するために行ったシミュレーション結果を示す．**4.** では，本研究のまとめを述べる．

## 2　分散無線ネットワーク用グループ化階層ルーティング方式

APFS における経路制御では，全ノード間の回線品質情報を記述したテーブルを，全ノード間で交換する．この回線品質情報テーブルは，ノード数の 2 乗に比例して大きくなる．また，この回線品質情報テーブルの交換には，制御パケットが用いられる．従って，ノード数とともに制御パケット量が増大し，相対的にユーザパケットが利用できる帯域は減少することになる．

本研究では，この問題を解決するため，APFS を改良した分散型無線ネットワーク用グループ化階層ルーティング方式 (GLRDWN: Grouped Layered Routing for Destributed Wireless Networks) を提案する．本方式では，ノードを複数のグループに分けることで，回線品質情報テーブルのデータ量を削減し，データパケットのスループット低下を抑えることを目指している．

[1] これらの特徴から，無線伝送路は非対称無線伝送路と呼ばれる [1]．

## 2.1 基本コンセプト

GLRDWN では，ノードを一定の通信品質が見込めるノード集合毎にグループ化し (図 1)，階層ソースルーティングをおこなう．つまり，パケット送信に先立って，グループ層での経路が決定される．グループ内でのルーティングはノード層でおこなわれ，ゲートウェイにおいてソースルーティングがおこなわれる．このような方式は有線ネットワークにおいても検討されているが [2]，次のような点で異なっている．

- 有線ネットワークの場合，ネットワークトポロジはほぼ固定である．このため，隣接ノード間のリンク情報のみを把握すればよい．一方，無線ネットワークでは，回線品質が動的に変化し，トポロジが動的に変化する．このため，各ノードは，自ノードへの無線到達範囲内の全ノードとの回線品質情報を把握する必要がある．
- 無線ネットワークの場合は，他グループへのゲートウェイとすべきグループ内のノードを，回線品質の変化に応じて，動的に変更する必要がある．グループ間との回線品質が良好なゲートウェイを決定するために，必要十分かつ最新の回線品質情報を選択し，グループ間回線品質情報とする必要がある．

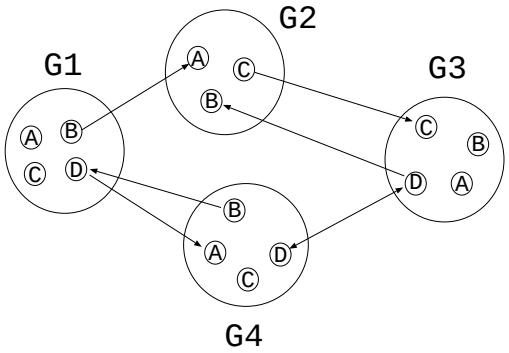


図 1: グループ化されたネットワークの例

分散型無線ネットワークにおいてグループ化階層ルーティングを実現するには，上記のような点を考慮したアルゴリズムが必要となる．

GLDWN では，グループ層とノード層で用いるルーティングテーブルがそれぞれ必要となる．これらのテーブルを構築するために，まず，各ノードは，全ノードからの受信側回線品質情報を保持する受信回線品質テーブル (以後，RQOW(Recieved Quality of Wireless link) テーブル) を作成する．

この情報をもとに，次の 3 つのテーブルが生成される．

- グループ内ノード間回線品質情報テーブル (以後，IGQOW (Internal Group Quality of Wireless link) テーブル (表 1))．グループ内のみで交換される．
- グループ間通信品質情報テーブル (EGQOW (External Group Quality of Wireless link) テーブル (表 4))．ネットワーク全体で交換される．
- ゲートウェイ候補となるグループ間ノード対の回線品質情報テーブル (以後，GWQOW (Gate-Way Quality of Wireless link) テーブル (表 3)．グループ内でのみ交換される．

IGQOW テーブルはグループ内ルーティングに用いられ，EGQOW テーブルはグループ間ルーティングに用いられる．また，GWQOW テーブルは EGQOW テーブルの生成に用いられる．これらのテーブルは，以下の手順で生成される．

IGQOW テーブルは，グループ内の送受信ノード間の回線品質情報を記述している．表 1 に IGQOW テーブルの例を示す．表中のアルファベットはグループ内におけるノード ID を表す．また，ここで示される数値はノード間のパケット到達率を表している．IGQOW テーブルは，各ノードが，RQOW テーブルの中から同一グループ内ノードに関する情報のみを抜きだし，最新の回線品質情報としてフラッディングすることで生成される．このフラッディングはグループ内のみでおこなわれ，他グループの IGOQL テーブル情報を受信しても中継することはない．これにより，制御トラヒック量の削減をはかる．

表 1: IGQOW テーブルの例

| | | 送信 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | A | B | C | D |
| 受信 | A | 1.00 | 0.90 | 0.95 | 0.00 |
| | B | 0.92 | 1.00 | 0.98 | 0.00 |
| | C | 0.95 | 0.96 | 1.00 | 0.90 |
| | D | 0.80 | 0.00 | 0.88 | 1.00 |

表 2 は，GWQOW (表 3)，EGQOW(表 4) で保持されるデータの単位を表しており，受信ゲートウェイ，送信ゲートウェイそれぞれのノード番号，ゲートウェイノード回線品質，回線品質の測定時刻を保持している．

表 2: EGQOW，GWQOW テーブルのデータ単位

| 送信ノード | 受信ノード | 回線品質 | 計測時刻 |
|---|---|---|---|
| 3 | 7 | 0.88 | 1255 |

GWQOW テーブルは，自グループの受信ゲートウェイと他グループの送信ゲートウェイ候補を記述している．このテーブルは次のように更新される．まず，各ノードは，自ノードの RQOW テーブルから，自ノードが他グループからの受信ゲートウェイとなった場合の他グループの送信ゲートウェイ候補を決定する．次に，これと，他ノードから受信した GWQOW テーブルに記述された候補ゲートウェイ対とを通信品質の観点から比較する．このとき，自ノードが他グループからの受信ゲートとしてふさわしければ，GWQOW テーブルの内容を，自ノードを受信ゲートウェイとした候補ゲートウェイ対の情報に書き換える．GWQOW テーブルは，グループ内でフラッディグされ，グループ内ノードで相互参照されることで，更新されていく．

表 3: GWQOW テーブルの例

| | 送信 | | | |
|---|---|---|---|---|
| | G1 | G2 | G3 | G4 |
| 受信 | | | | |

EGQOW テーブルは，グループ間のゲートウェイ候補となる送受信ノード対 (候補ゲートウェイ対) とその間の通信品質を記述している[2]．この EGQOW テーブルは，GWQOW テーブルにもとづき次のように更新される．[3]他ノードから受信した EGQOW テーブルは，まず，自ノードの GWQOW テーブルの内容と比較される．この GWQOW テーブルに記述された送受信ゲートウェイ対の通信品質が，EGQOW テーブルに記述されたグループ間ゲートウェイ対の通信品質より良ければ，EGQOW テーブルの内容をこれと書き換える．この EGQOW テーブルは，ネットワーク全体でフラッディグされ，全ノードで相互参照されることで，更新されていく．

表 4: EGQOW テーブルの例

| | | 送信 | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | G1 | G2 | G3 | G4 |
| 受信 | G1 | | | | |
| | G2 | | | | |
| | G3 | | | | |
| | G4 | | | | |

次に，以上のような方法で回線品質制御情報をノード間で交換することにより，制御トラヒック量がどの程度削減されるかについて検討する．

全ノード数を $N$ とし，これを $K$ グループに均等に分割した場合，一グループ内のノード数は $N/K$ ノードとなる．この場合，ノードが交換する制御情報は，$N/K \times N/K$ の IGQOW テーブルと $K \times K$ の EGQOW テーブルそして，$K$ の GWQOW テーブルとなる．一方，グループ化しない場合は，$N \times N$ の回線品質情報テーブルが交換されることになる．単純に考えれば，交換されるテーブル要素数は，$K$ グループに分割することで $2/K^2 + K/N^2$ 倍になり，減少する．例えば，$N = 20$，$K = 4$ とすれば 0.135 倍になる．このことから，グループ化により，制御トラヒック量が減少しできることが分かる．これにより，データトラヒックのスループットの向上が期待できる．

## 2.2 回線品質情報テーブルの生成

### 2.2.1 回線品質の伝送

周波数共用型無線ネットワークでは，電波到達範囲内の全ノードに同じデータが受信される．しかし，分散型無線ネットワークでは，電波到達範囲がネットワーク全体に及ぶとは限らないため，ノードの中継機能を利用して回線品質情報を他ノードに伝達する．回線品質情報は，測定時刻が新しい内容に書き換えられ，順に中継されていく．

[2]回線品質の変動やノード障害に対する冗長性を与えるため，本研究では，ゲートウェイ対 (EGQOW テーブル) と候補ゲートウェイ対 (GWQOW テーブル) の 2 組を考慮した．

[3]GWQOW テーブルには，自グループの受信ゲートウェイ候補と他グループの送信ゲートウェイ候補が記述されていることに注意する．

IGQOW テーブル，GWQOW テーブルは，グループ内でフラディングされ，EGQOW テーブルはネットワーク全体にフラディングされる．ノードは，他グループの IGQOW，GWQOW テーブルを受信した場合は，その情報を破棄する．

### 2.2.2 回線品質の測定

各ノード間の回線品質の測定は，APFS と同じ手法をとる．つまり，回線品質情報伝送用パケットとデータパケットに回線品質測定用の情報を埋め込み，受信側でノード間のパケット損失率と，ビット誤り率を測定することでおこなう．測定結果は回線品質情報として RQOW テーブルに保持する．

### 2.2.3 回線品質情報の更新

IGQOW テーブルには，同一グループ間の回線品質情報が保持される．このテーブルは，次の二つの場合に更新される．

1. 回線品質を計測したとき．
2. 同一グループ内ノードが送信した IGQOW テーブルを受信したとき．

1. の場合，RQOW テーブルの内容のうち，同一グループ内のノードを送信局とする回線品質情報が IGQOW テーブルに反映される．2. の場合，他ノードから受信した IGQOW テーブルと自ノードの IGQOW テーブルを比較し，自ノードの IGQOW テーブルの内容を測定時刻の新しいデータに書き換える．この IGQOW テーブルは，同一グループ内でフラッディングされる．

GWQOW テーブルには，同一グループ内のノードを受信ゲートウェイとし，他グループ内のノードを送信ゲートウェイとした場合の通信品質情報が保持される．このテーブルは，次の二つの場合に更新される．

1. 回線品質を計測したとき．
2. 同一グループ内ノードが送信した GWQOW テーブルを受信したとき．

1. では，GWQOW テーブルにおいて自ノードが受信ゲートウェイ候補となっている場合，関連するデータを測定した回線品質に更新する．また自ノードが受信ゲートウェイ候補でない場合，GWQOW テーブルと RQOW テーブルを比較する．自ノードを他グループからの受信ゲートウェイとした方が回線品質が良ければ，GWQOW テーブルを自ノードを受信ゲートウェイとするように書き換える．2. の場合，受信した GWQOW テーブルに書かれた回線品質情報の計測時間を調べ，自ノードの GWQOW テーブルに示される計測時間より新しければ，自ノードの GWQOW テーブルの内容をこれに更新する．

EGQOW テーブルには，全グループ間のゲートウェイとなるノードとゲートウェイの回線品質が保持される．このテーブルは，次の二つの場合に更新される．

1. 受信ゲートウェイとなっているノードが回線品質を計測したとき．
2. GWQOW テーブルを更新したとき．
3. EGQOW を受信したとき．

1. の場合，RQOW テーブルから，ゲートウェイ間の回線品質を更新し，EGQOW テーブルと GWQOW テーブルを比較し，GWQOW の方が回線品質が良ければ，EGQOW テーブルと GWQOW テーブルのデータを入れ換える．

2. の場合，EGQOW テーブルと GWQOW テーブルを比較し，GWQOW テーブルの方が回線品質が良い場合，EGQOW のデータと GWQOW のデータを入れ換える．

3. の場合，受信した EGQOW テーブルと，自ノードの EGQOW テーブルを比較し，新しいデータに更新する．

ここで 1，2 の場合に EGQOW テーブルと GWQOW テーブルのデータを入れ換えるのは，EGQOW テーブルと GWQOW テーブルを用いて 2 組のゲートウェイ対の候補を保持させ，回線品質の変動やノード障害に対する冗長性を与えるためである．

以上のような方法で各テーブルの更新をおこなう．

## 2.3 経路制御

GLRDWN での経路制御には，階層ソースルーティングを利用する [2]．具体的にはまず，送信局がグループ層でグループ単位のソースルーティングを行う．次に，グループ内の経路選択は，中継グループの受信ゲートウェイがノード層で次グループの受信ゲートウェイまでの経路をソースルーティングする．

送信局が含まれるグループを送信グループ，目的局

が含まれるグループを目的グループとよぶ．また，送信グループでもなく，受信グループでもない，中継のみに利用されるグループを中継グループとよぶ．

GLRDWN における経路制御の手順は以下のとおり．

1. 送信局は，送信グループから目的グループまでの経路を，グループ単位で決定し，この経路をパケットに書き込む．
2. 中継グループ内での経路は，ノード層でのソースルーティングによって決定される．中継グループの受信ゲートウェイは，EGQOW テーブルにもとづき，次グループへの送信ゲートウェイと受信ゲートウェイを決定する．次に，次グループへの送信ゲートウェイまでの経路を，IGQOW テーブルにもとづいて決定する．この経路に次グループの受信ゲートウェイを加えた経路をパケットに書き込む．グループ内の各ノードではパケットに記録された経路に従いパケットの中継を行う．
3. 2. を繰り返し，目的グループまでパケットを中継する．
4. 目的グループまでパケットが中継されると，受信ゲートウェイは，IGQOW テーブルにもとづき，目的ノードまでの経路を決定し，パケットに経路を記録する．但し，送信グループと目的グループが同一の場合は，送信局が目的局までの経路を決定し，パケットに書き込む．目的グループ内のノードは，パケットに書き込まれた経路情報をもとに，目的ノードまでパケットを中継する．

# 3 評価

本章では，GLRDWN におけるグループ階層化の効果をシミュレーションにより評価する．

以下のシミュレーションでは，ノード数に対するパケット到達率特性と，グループ数に対するパケット到達率の変化を，APFS を用いた場合と比較し，評価する．

## 3.1 シミュレーションモデル

シミュレーションは以下のようなモデルで行う．

- マルチプルアクセス方式には，Slotted ALOHA を用いる．
- 無線電波の伝搬遅延はないものとする．
- 受信電力 $S$ が 90dBm 以上ならば受信可能とする．
  受信信号電力と雑音電力の比が $S/N = 14$dB の時に，$BER = 10^{-6}$ となる受信機が用いられ，$BER = 10^{-6}$ 以下ならば，パケットは正しく受信されるものと仮定した．
  - 占有帯域幅：22MHz
  - 内部雑音指数 7dB
  - 拡散利得 $G_p = 10.4$dB

  とすると，熱雑音は次式で計算できる．

$$T_n = 174 + 10\log_{10} 22\times 10^6 = -100.6\text{dBm} \quad (1)$$

  よって，雑音電力は次のようになる．

$$N = T_n + 7 - G_p = 104\text{dB} \quad (2)$$

  従って，受信電力 $S$ が 90dBm 以上ならば，$BER = 10^{-6}$ となる．
- 受信電力 $R_{xp}$ は以下の式に従い算出する．

$$R_{xp} = T_{xp} + G_{atx} - L_p + G_{arx}\ \text{dBm} \quad (3)$$

  ここで，
  - 電力の伝搬損失：$L_p$dB
    $L_p = 22 + 20\log_{10}(R/\lambda)$　(ここで $R$ は距離，$\lambda$ は波長である)
  - 送信機の出力：$T_{xp}$dBm
  - 送信アンテナ利得：$G_{atx}$dB
  - 受信アンテナ利得：$G_{arx}$dB

  である．
- 捕捉効果電力比を 3dB とする．
  スロット競合が発生した場合，最大受信電力を持つパケットと他のパケットの受信電力の総和を比較し，3dB 以上の差がある場合は捕捉が成功すると仮定した．
- パケット発生間隔は幾何分布に従う．
- 回線品質の測定は，パケットのシーケンス番号からパケット到達率を測定し，これを回線品質とする．

### 3.2 シミュレーション結果

表 5 に示されるパラメータを用いて，シミュレーションを行った．図 2，3 に結果を示す．

図 2 では，グループ数を 4 に固定し，ノード数を 25 から 50 まで変化させている．この結果から，APFS を用いた場合では，ノード数の増加に伴いパケット到着率が減少している．GLRDWN においても，ノード数の増加に伴いパケット到着率が減少しているが，APFS に比べ，その減少を抑えることができた．特にノード数 50 の場合では，APFS に比べパケット到着率が，約 0.15 改善できる．これらの結果から，APFS にグループ化階層構造を取り入れることで，パケット到着率を改善できることが分かった．

図 3 では，ノード数を 50 に固定し，グループ数を 1 から 12 まで変化させている．この結果から，グループ数が 4 のとき，最もパケット到達率が良くなっていることがわかる．グループ数が少ないとき，パケット到達率が改善されない理由は制御パケットの量が十分減少しないためと考えられる．また，グループ数が多い場合は，逆に制御パケットの量が増加しパケット到達率が低下しているものと考えられる．

表 5: シミュレーションのパラメータ

| | |
|---|---|
| パケット発生率 | 0.005 / 0.01 |
| ノード数 | 25 ~ 50 / 50 |
| グループ数 | 4 / 1 ~ 12 |
| エリア | $15 \times 15$km / $20 \times 20$km |
| 無線機の電力 | 14.7dBm |
| 回線品質測定期間 | 2000slot / 3000slot |
| 計測期間 | 500000 / 1000000 |

## 4 結論

本研究では，分散型無線ネットワーク用グループ化階層ルーティング方式を提案した．また，シミュレーションを用いて，提案方式と APFS を比較し，評価を行った．この結果から，APFS に階層構造を取り入れることでパケット到達率が改善されることがわかった．

提案方式は，EGQOL の伝達に時間がかかることも観測されたため，改善の余地があることがわかった．また，グループ化階層ルーティング方式の有効なノード数，グループ数の関係をより詳細に調べる必要がある．

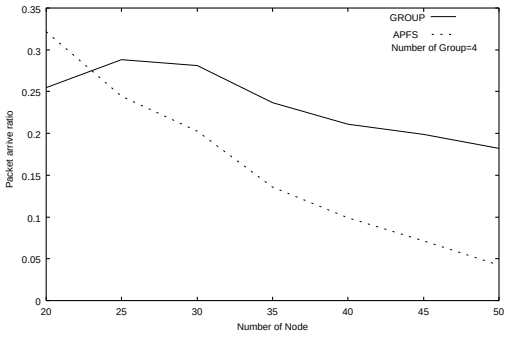


図 2: ノード数に対するパケット到着率特性

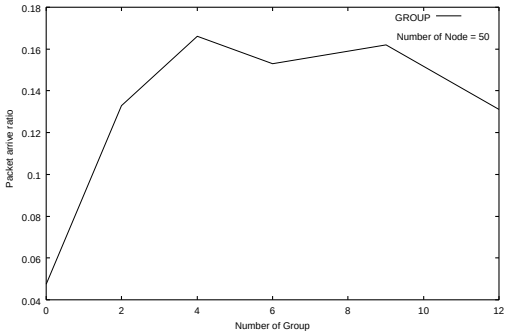


図 3: グループ数に対するパケット到着率特性

## 参考文献

[1] 菅野伸一, “無線回線用非対象適応経路制御システム APFS,” 日本ソフトウェア科学会 研究会資料シリーズ, No.9 ISSN 1341-870X. pp.107-116, 1998.

[2] Shigang Chen and Klara Nahrstedt, “An Overview of Quality of Service Routinng for Next-Generation High-Speed Netwprks:Prblem and Solutions,” IEEE NETWORK, pp.64-79, November/December 1998.