

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 5 月 22 日現在

機関番号：10101

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2012～2014

課題番号：24360144

研究課題名(和文)分散ネットワークのための指向性制御付ルーティング

研究課題名(英文)Routing for wireless mesh networks with beam/null control

研究代表者

大鐘 武雄 (Ohgane, Takeo)

北海道大学・情報科学研究科・准教授

研究者番号：10271636

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,800,000円

研究成果の概要(和文)：無線分散ネットワークは災害時の緊急ネットワークの候補などとして注目されている。しかし、有線ネットワークと異なり、全てのノードが互いに結合されているため干渉が懸念される。ここでは、指向性制御機能を各ノードに付加した際のクロスレイヤー処理を検討した。第2層の指向性制御とその実装について検討するとともに、第3層で迂回経路選択によりスループットを改善できることを明らかにした。

研究成果の概要(英文)：Wireless mesh networks are considered as an efficient candidate for a substitution of communication infrastructure in disaster situations. Such a network is suffered by mutual interferences between nodes since all nodes are reachable. We studied a cross layer processing to exploit this overreach by using beam/null control at each node. Specifically, beam/null control and its experimental test using USRP in the layer 2 were carried out. In addition, we clarified that the alternative routing with beam/null control in the layer 3 improved the throughput performance.

研究分野：無線通信工学

キーワード：分散ネットワーク ルーティング 指向性制御 USRP

1. 研究開始当初の背景

無線分散ネットワークは、災害時の緊急ネットワークの候補などとして注目されている。しかし、有線ネットワークと異なり、各ノードが隣接ノード以外の多くのノードと通信可能であるため、互いに干渉を及ぼす可能性がある。ここで、指向性制御機能を各ノードに付加すれば、図1のようにリンク間の干渉を低減し、同時に複数のリンクが存在し得る。この利点を生かし、第2層(L2)でリンクを確立する際に指向性制御を行う提案が多く存在する。

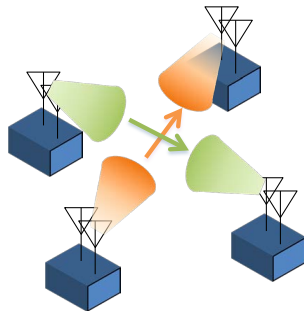


図1 同時通信可能な例

一方、無線分散ネットワークでは、一部のノードに負荷が集中することがあり、パケットの滞留に注意する必要がある。このような問題が発生した場合、図1のようなリンクの空間多重を利用して、経路の再設定を行うとスループット特性が改善することが期待できる。しかし、第3層(L3)も考慮した指向性制御に関しては、これまで全く検討されていなかった。したがって、指向性制御の恩恵を十分に受けていなかった可能性がある。

2. 研究の目的

前述の通り、リンクの空間多重を考慮した経路設定も含め、指向性制御による無線分散ネットワークのスループット改善が大きな目標である。ただし、限られた人的リソースを考えれば、完全に最適な構成を導くことは困難である。そこで、本課題では3つの目標を設定した。

一つは、無線分散ネットワークの大きな特徴であるオーバーリーチ(意図しないノードへの信号到達)を利用した指向性制御の高度化である。次に、簡易な通信装置を用いた指向性制御の動作確認を行い、高価な専用装置がなくても十分に指向性制御が機能することを実証することである。最後は、これら指向性制御を考慮したL3の経路設定の提案である。以上の課題を達成することで、将来の無線分散ネットワークの構築に寄与することが、本課題の目的である。

3. 研究の方法

前記の3つの目標を達成するため、それぞれ具体的なテーマを以下のように掲げることとした。

指向性制御の高度化に関しては、通信対象でないノードを中継ノードに利用し、中継ノードからも宛先ノードに送信することを考える。これ自体は全く既存の考え方である。しかし、宛先ノードで始点ノードと中継ノードの両方を受信できる場合、始点ノードから中継ノードへのオーバーリーチ量を調整することで受信特性を最適化できる。そこで、始点ノードが宛先ノードと中継ノードの両方に適切に届くような指向性制御について検討を行うものとした。

簡易な装置による指向性制御の動作確認に関しては、汎用ソフトウェア無線機(USRP)を複数台使い、伝送実験を本学内の電波暗室にて行うものとした。ただし、指向制御アルゴリズムには、第一段階として簡易な最大比合成(MRC)とゼロフォーシング(ZF)のみを用いた。ビーム制御とヌル制御の両アルゴリズムが動作すれば、他のより複雑な制御も行うと考える。

最後は、L2での指向性制御を考慮したL3での経路設定である。各ノードでのパケット生起により、空間多重されるリンクは時々刻々変化する。これに忠実に最適経路を導くことは、他の通信リンク状況の変化を事前に知る必要がある。これには、いわゆる神の手による集中制御が不可欠である。

ここでは、より実現性の高い手法を目指し、各ノードの通信開始時に、待機か、各ノードが有する最短経路・迂回経路のどちらかを選択できるプロトコルを考えた。そして5x5のノード配置を仮定した計算機シミュレーションによりスループット特性を評価した。

これらの結果に関して、以降で簡単に述べる。

4. 研究成果

4.1 中継伝送を考慮した始点指向性制御
ここでは、一つの中継ノード(R)を利用した宛先ノード(D)への中継伝送を考える。なお、中継ノードでは、次のスロットで受信信号を適切なレベルに増幅して送信する2ステップAF(amplitude forward)伝送を仮定した。また、中継ノードは宛先ノードへ最適な指向性制御を行うものと仮定した。

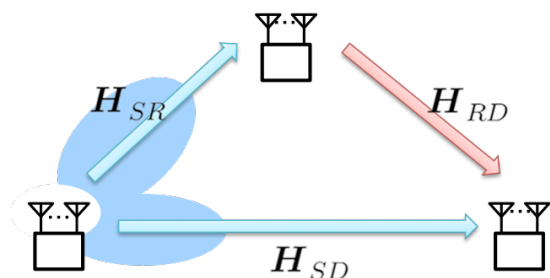


図2 各ノード間のチャネル行列

各ノードがそれぞれ複数のアンテナを有する場合、各ノード間のチャンネルは図2のように MIMO チャンネルとなる。この図において、赤の中継・宛先ノード間は、送信 MRC ビーム制御により送信する。

一方、青の始点ノード (Source) から送信する場合、始点ノードから直接宛先ノードへ届く信号と、中継ノードを経由して届く信号が、宛先ノードで最適に合成されることになる。このときの、合成後信号は次式で与えられる。

$$y_D = \frac{\sqrt{P_S}(\mathbf{H}_{SD}\mathbf{w}_S)^H}{\sigma^2}\mathbf{y}_{SD} + \frac{\sqrt{P_S}G\|\mathbf{H}_{SR}\mathbf{w}_S\|(\mathbf{H}_{RD}\mathbf{w}_R)^H}{G^2\|\mathbf{H}_{RD}\mathbf{w}_R\|^2\sigma^2 + \sigma^2}\mathbf{y}_{RD}$$

この式には、第1ステップで受信した始点ノードからの信号と、第2ステップで受信した中継ノードからの信号のみならず、始点ノードの送信ウェイトと、それに依存する中継ノードの受信ウェイトを含む。この SN 比を最大にするには、以下の評価関数を最大にすればよい。

$$J_C = \|\mathbf{H}_{SD}\mathbf{w}_S\|^2 + \frac{P_R\|\mathbf{H}_{SR}\mathbf{w}_S\|^2\|\mathbf{H}_{RD}\mathbf{w}_R\|^2}{P_R\|\mathbf{H}_{RD}\mathbf{w}_R\|^2 + P_S\|\mathbf{H}_{SR}\mathbf{w}_S\|^2 + \sigma^2}$$

評価関数はこのように求まるが、これより始点ノードの送信ウェイトを解析的に求めることができない。そのため、ここでは、最急降下法に基づく繰り返し手法と、解析的に求まる近似解の二つについて検討した。

シミュレーションでは、各ノードが2アンテナを有する場合を仮定した。伝搬品質は、始点ノードと宛先ノード間の平均 SN 比を基準として、中継ノードと宛先ノード (R-D) 間の SN 比を+3dB と固定し、始点ノードと中継ノード (S-R) 間の SN 比を+3dB と+10dB の二つの場合を考えた。チャンネルは準静的のレイリーフェージング環境であり、各チャンネルはすべて無相関としている。

図3と図4に平均 PER (Packet Error Rate) と送信電力 (SN 比に相当) との関係を示している。なお、比較対象として、宛先ノードの合成後品質を無視し、第1ステップにおける宛先ノードでの受信信号の SN 比と、同じ第2ステップにおける中継ノードでの受信信号の SN 比の和を最大にする送信ウェイトについても評価した。

図4のように、S-R 間の SN 比があまり高くない場合には、宛先ノードでの合成後信号の品質に中継ノードからの信号の寄与がそれほど大きくなく、始点ノードの最適指向性の効果が高くない。

一方、図5のように S-R 間の品質が高くなると、合成後信号中に含まれる中継ノードからの信号成分が大きくなるため、始点ノード

で中継ノードをより重視した指向性制御が重要になると思われる。そのため、宛先ノードの品質を考慮しない簡易な指向性制御よりも最適指向性による利得が明らかに見られる。

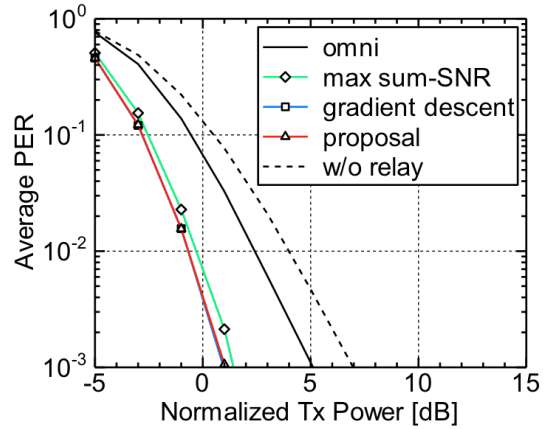


図3 S-R 間の品質が高くない場合 (S-R: +3dB, R-D: +3dB)

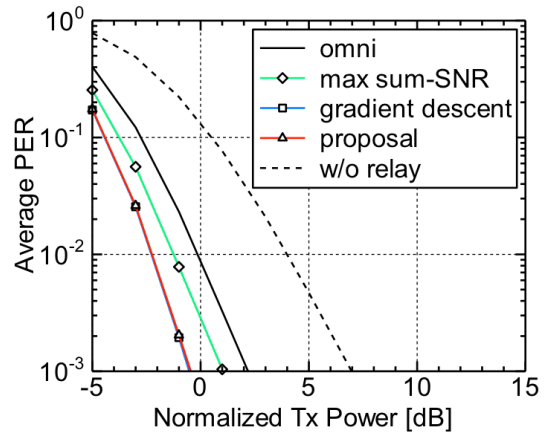


図4 S-R 間の品質が高い場合 (S-R: +10dB, R-D: +3dB)

なお、繰り返しにより最適解を求めた場合と、近似解との特性差はほとんどなく、解析的に求まる近似解が非常に有効であるといえる。

以上のように、無線分散ネットワークでは、オーバーリーチを干渉として捉えるだけでなく、中継ノードとして積極的に利用することも可能である。L2 での最適化では、この点も考慮することで、特性改善が得られる場合があることに注意すべきである。

4.2 USRP を用いた指向性制御実験

L2 での指向性制御を行うには複数アンテナによる信号処理が必要である。これらの特性には、RF 回路の品質も影響する。無線分散ネットワークでは、無線 LAN などの比較的低価格な機器がノードを構成することも考えられる。このような機器での指向性制御品質について検討するため、ここでは、USRP を用

いて指向性制御実験を行うこととした。

ここで使用した USRP はナショナルインストルメント社の USRP-2921 という 2.4GHz 帯と 5GHz 帯の 2 つの RF 周波数帯を使用可能なものである。これには 1 アンテナしか搭載できないため、1 ノードにつき 2 台の USRP を MIMO ケーブルと呼ばれる専用ケーブルで接続し、結合動作させることとした。

本実験では 4 ノードを用意し、最初にリンクを張った既存（プライマリ）リンクと、既存リンクに干渉を与えないようリンクを張った新規（セカンダリ）リンクを想定した。概念を図 5 に示す。既存リンクは自リンクのみの特性を考慮すればよいのに対し、新規リンクは既存リンクへの与干渉を防ぐ必要がある。

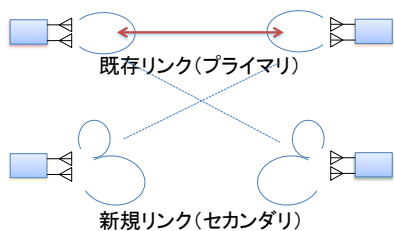


図 5 空間多重の概念

ここでは、既存リンクの指向性制御を送受信 MRC とし、新規リンクは与干渉を完全にゼロにする ZF (zero-forcing) アルゴリズムを用いることとした。

L2 での指向性制御プロトコルについては、他にも種々の検討があるため、詳細は割愛する。基本的に、送信ノードからパイロット信号を送信し、受信ノードからチャネルを帰還することで指向性制御を行う。ただし、新規リンクの場合には、既存リンクの ACK パケットを用いて、既存リンクの受信ノードに干渉を与えないビームを複数生成し、これらのビーム毎にチャネルを推定する手法とした。

実験の諸元は次の通りである。中心周波数は 2.45GHz、シンボルレート 83.3kbps の QPSK 変調を用いた。各ノードのアンテナ素子は水平面内無指向性のコリニアアンテナを垂直偏波として使用し、間隔は 6cm (0.49 波長) とした。各 USRP は全て (8 台) 電波暗室内に設置し、暗室外の PC にて制御した。電波暗室内外の様子を図 6, 7 に示す。

以上の構成にて、既存リンク、新規リンクの指向性パターンを測定した。その結果を図 8, 9 に示す。なお、対象ノードが回転台に設置されていることに注意してほしい。

図 8 の既存リンクの指向性パターンは正面 (0 度) 方向に最大利得のビームが向いており、正しく指向性が形成されていることがわかる。さらに、図 9 の新規リンクの指向性パターンは 28 度方向、すなわち、既存リンクの送信あるいは受信ノード方向に、正しく深いヌルが向けられていることがわかる。

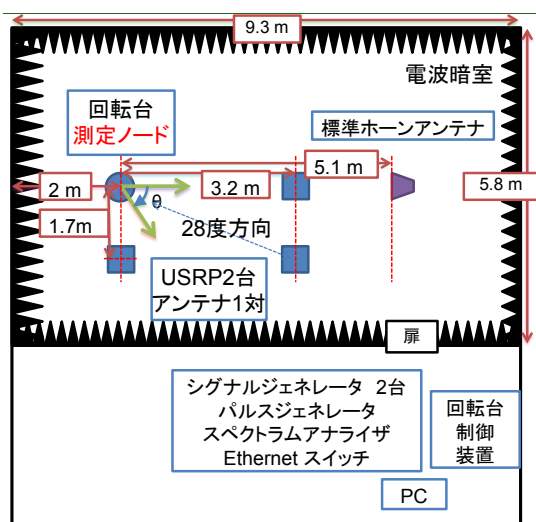


図 6 電波暗室内外の配置



図 7 電波暗室内の風景 (右手前が回転台)

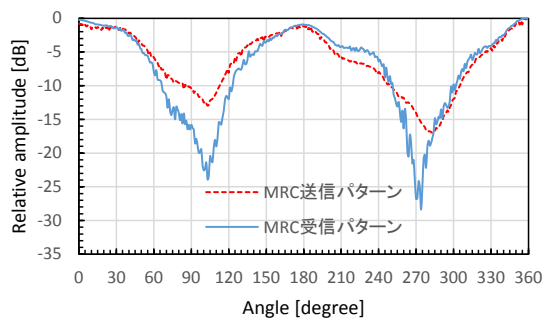


図 8 既存リンクの指向性パターン

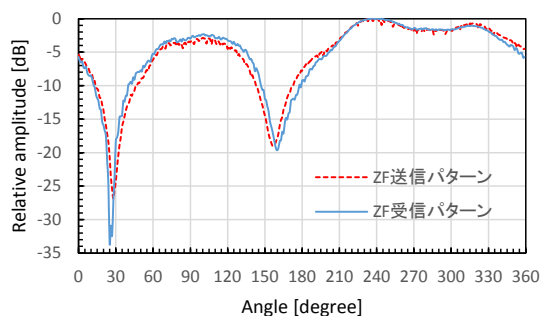


図 9 新規リンクの指向性パターン

USRP は非常に簡易な機器であり、特に RF

回路の精度はそれほど高くない。実際、電力レベルの設定値と実効値には USRP によりばらつきがあった。それでも、このように指向性制御が行えることが示されたのは、無線分散ネットワークでの指向性制御応用が可能であることを実証するものである。

4. 3 指向性制御を考慮した L3 での経路制御

最後に L3 での経路制御への応用を考える。L3 では無線分散ネットワークにおける経路をどのように決定するかが重要である。事前に経路を探索するプロアクティブ型と、パケット生起時に探索するリアクティブ型に分かれる。ここでは、プロアクティブ型を仮定し、図 10 に示すように、事前に全ての宛先ノードへの最短経路を確定するものとした。ただし、ここでは、他のリンクの空間多重は考慮せず、最大の SN 比が達成できる指向性制御の下で最短経路を探索した。

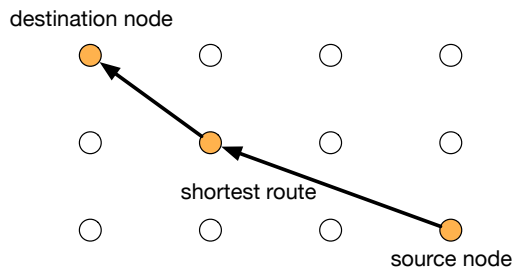


図 10 最短経路の概念

一方、各ノードの指向性制御は SN 比最大化にとどまらず、与干渉・被干渉も低減できる。そのため、実際にはリンクの空間多重が行える可能性がある。これも考慮した最適経路探索は、すべてのパケット生起課程を知る必要があり、非現実的である。そこで、ここでは、各ノードが最短経路以外に、もう一つ迂回経路を探索しておくものとした。その概念を図 11 に示す。

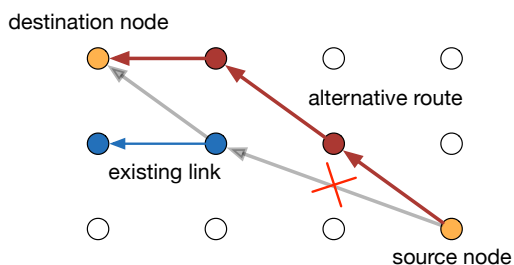


図 11 迂回経路の概念

図 11 の例では、経路上の次の宛先ノードが通信中であり、この経路を使用するためには、通信終了を待たねばならない。これを回避する手段として、茶色で示した迂回経路の

使用を検討する。具体的には、現時点で予測される待ち時間も含めた最短経路の総通信時間と、迂回経路の総通信時間を比較し、通信を開始するか、開始するとしてどちらの経路を使用するかを決定する。

この迂回経路は比較的簡易であり、当該ノードが周囲の状況把握のみで決定できる。しかし、実際にはその先の通信状況に依存するため、最適な経路決定ではない。そのため、5x5 の 25 ノードで構成される簡単なモデルを仮定し、スループット特性（始点ノードから最終宛先ノードまでの総通信時間でパケットデータ量を除したもの）を評価した。

ユースケースのシナリオは、中心ノードがゲートウェイであり、すべての生起パケットの最終宛先ノードがこのノードである場合である。この場合について計算機シミュレーションを行った。パケットサイズは 100kB、帯域は 10MHz、チャンネルは距離減衰のみを仮定した簡易なモデルであり、素子間のチャンネルはランダムな位相回転のみ仮定した。最小距離の SN 比は 20dB とした。

図 12 にスループット特性を示す。迂回経路選択可能とすることでスループットが向上していることがわかる。迂回経路ありの場合、待ち時間が大幅に減少する。これは、全パケットの最終宛先ノードが共通のため、その周囲のノードにパケットが集中するためである。このとき、迂回経路を選択すれば、待たずに他の近傍ノードに転送でき、総通信時間を短縮できると考えられる。このようなシナリオの場合には、簡易な迂回経路の設定も非常に有効な手段であるといえる。

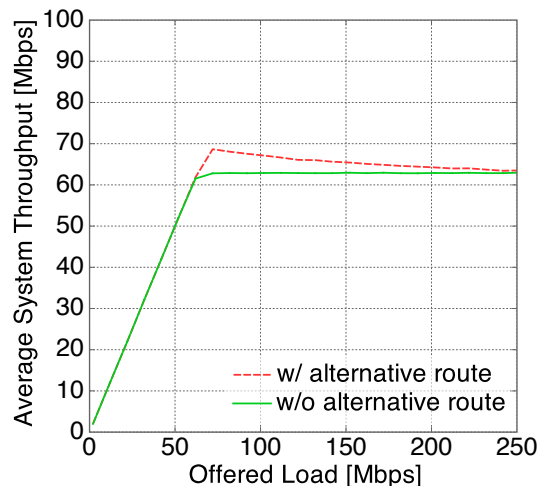


図 12 スループット特性

このように、指向性制御を考慮した L3 の処理を行うことで、さらにスループットが向上できることは極めて新しく有効な結果である。今後は、さらに高度な経路決定手法の開発など、引き続き発展が期待できる。

5. 主な発表論文等
〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕（計 9 件）

- [1] N. Kiyomi, J. Webber, T. Nishimura, T. Ohgane, Y. Ogawa, "A Study on Transmit Beamforming at Source Node in MISO-SISO/MIMO-MIMO AF Relays," IEEE VTC 2012 Spring, pp.1-5, May 2012.
- [2] 出雲恭輔, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, " USRP を用いたマルチホップネットワークの実装," 平成 24 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会, 2012 年 10 月.
- [3] 清見直史, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "複数アンテナを持つ終点での FDE を用いた Full-Duplex AF リレー伝送に関する検討," 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2012 年 12 月.
- [4] 清見直史, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "Full-Duplex AF リレーにおける MMSE-FDE に関する検討," 電子情報通信学会総合大会, 2013 年 3 月.
- [5] 出雲恭輔, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "無線メッシュネットワークの構築を目指した LabVIEW による USRP 制御について," 平成 25 年度電気・情報関係学会北海道支部連合大会 2013 年 10 月.
- [6] 出雲恭輔, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "LabVIEW と USRP を用いた無線メッシュネットワーク用指向性制御の基礎的検討," 電子情報通信学会総合大会, 2014 年 3 月.
- [8] 鈴木宏典, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "アダプティブアレーを用いた無線メッシュネットワークにおける迂回経路選択効果," 電子情報通信学会無線通信システム研究会, 2014 年 12 月.
- [9] 鈴木宏典, 西村寿彦, 大鐘武雄, 小川恭孝, "アダプティブアレーを用いた無線メッシュネットワークにおける迂回経路選択の特性評価," 電子情報通信学会総合大会, 2015 年 3 月.

〔図書〕（計 0 件）

〔産業財産権〕

- 出願状況（計 0 件）
- 取得状況（計 0 件）

〔その他〕

特になし

6. 研究組織

(1) 研究代表者

大鐘 武雄 (OHGANE, Takeo)
北海道大学・大学院情報科学研究科・准教授
研究者番号：10271636

(2) 研究分担者

小川 恭孝 (OGAWA, Yasutaka)
北海道大学・大学院情報科学研究科・教授
研究者番号：70125293

西村 寿彦 (NISHIMURA, Toshihiko)
北海道大学・大学院情報科学研究科・助教
研究者番号：70301934

ウェバー ジュリアン (WEBBER Julian)
株式会社国際電気通信基礎技術研究所・その他部局・研究員
研究者番号：90466425