

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 24 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25330023

研究課題名(和文)空間点過程を用いた無線通信ネットワークの性能評価

研究課題名(英文) Performance evaluation of wireless communication networks using spatial point processes

研究代表者

三好 直人 (Miyoshi, Naoto)

東京工業大学・情報理工学(系)研究科・教授

研究者番号：20263121

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、無線通信ネットワークの中でもセルラネットワークに着目し、基地局の位置を空間点過程(空間にランダムに配置された点の集合)を用いてモデル化することにより、ネットワークの解析と性能評価を行いました。特に、ジニブル点過程と呼ばれる、点同士が互いに負の相関をもった空間点過程を用いてセルラネットワークの基地局の配置をモデル化し、その解析を通してネットワークの性能評価を行いました。

研究成果の概要(英文)：In this work, we considered the spatial stochastic models of wireless communication networks, in particular cellular networks, where the configuration of wireless nodes are represented by spatial point processes. Through the analysis of the models, we evaluated the performance of cellular networks both theoretically and numerically.

研究分野：応用確率論

キーワード：確率モデル 空間点過程 無線通信ネットワーク セルラネットワーク 性能評価

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初以前から現在に至るまで、無線通信ネットワークの無線ノードの位置を空間点過程 (与えられた空間にランダムに配置された点の集合) によってモデル化した**空間確率モデル**が、ネットワークの性能評価および設計のためのモデルとして活発に研究されています。これは、無線通信ネットワークの性能が無線ノードの配置に大きく依存すること、さらに実際の無線ノードは規則正しく配置されている訳ではなく、地理的な要因等から一見ランダムに見える配置をしていること等に起因しています。ところが、多くの既存研究では、解析の容易さのために、無線ノードが定常ポアソン点過程と呼ばれる最も基本的な点過程に従って配置されていることを仮定しています。このことは、無線ノードが互いに独立に配置されていることを意味し、ノードの位置の相関を無視していることとなります。しかし、セルラネットワークの場合、基地局同士が互いに近くなり過ぎないように設計され、配置されている筈であり、点が互いに負の相関を持って配置されるようなモデル化が望ましいと考えていました。

2. 研究の目的

本研究の目的は、無線ノードの位置の相関、特に負の相関を考慮した空間点過程を用いることにより、より現実的な無線通信ネットワークの空間確率モデルを構築し、その解析を通して無線通信ネットワークの性能評価を行うことです。

3. 研究の方法

本研究では、主にジニブル点過程、あるいはその変種である α -ジニブル点過程と呼ばれる空間点過程を用いてセルラネットワークの基地局の位置をモデル化し、そうして得られたモデルに対して**被覆確率**と呼ばれる代表的な性能評価指標を数値計算可能な形で導出しました。そして数値計算を通して得られた結果の考察を行いました。さらに、被覆確率の漸近的な評価や近似手法の提案等も行いました。

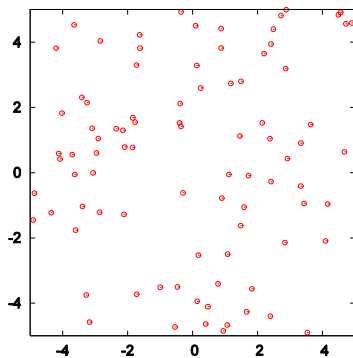


図 1: 定常ポアソン点過程のサンプル

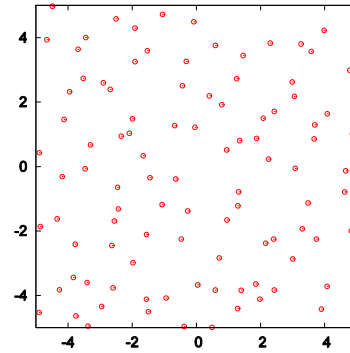


図 2: ジニブル点過程のサンプル

図 1, 2 はそれぞれ定常ポアソン点過程とジニブル点過程のサンプルです。定常ポアソン点過程では、各点が互いに独立に位置しているために、大きく隙間が空いているところや複数の点が塊になって位置しているところが見られますが、ジニブル点過程のほうは点同士が互いに負の相関を持って位置しているため、ランダムでありながらもバランスよく配置している様子が見られます。

4. 研究成果

(1) まず雑誌論文 [1] では、基地局がジニブル点過程に従って配置されたセルラネットワークのモデルを提案し、そのモデルに対して被覆確率を数値計算可能な形で導出し、実際に数値計算を行いました。結果として、ポアソン点過程を用いた従来のモデルよりも現実に近い被覆確率の値が導かれることが確認されました。さらに、被覆確率の漸近的な性質も導いています。

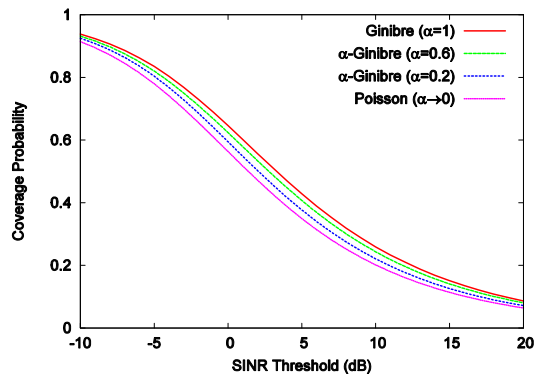


図 3: α の値による被覆確率の比較

雑誌論文 [1] では、基地局の配置のモデルを α -ジニブル点過程に一般化するとともに、基地局の密度や送信信号の強さ等が異なる複数種類の基地局を持つセルラネットワークのモデルも解析しました。ここで、 $\alpha=1$ のとき通常のジニブル点過程に一致し、 $\alpha \rightarrow 0$ において定常ポアソン点過程に弱収束することが知られています。さらに、学会発表 [2] では、基地局が α -ジニブル点過程に従って配置されたモデル

に対して、被覆確率の漸近的な性質を導きました。図3は、 α の値による被覆確率の変化を数値計算により比較した結果です（雑誌論文 より引用）。少なくとも数値実験の範囲では α の値による単調性が見られますが、実は漸近的には必ずしも単調でないことを学会発表 で示しています。

(2) ここまでの研究成果を通して、ジニブル点過程、あるいは α -ジニブル点過程を用いたモデルでは、被覆確率の数値計算に非常に多くの時間がかかることが確認されました。そこで学会発表 では、被覆確率に対して Padé 近似と呼ばれる近似手法を適用し、数値実験によって近似の精度および計算時間の短縮の効果を確認しました。図4は被覆確率に対して直接数値計算を行った場合と Padé 近似を適用した場合の比較結果です（学会発表 より引用）。少なくとも“SINR Threshold”の値が小さな範囲では、十分な近似精度が得られていることが確認できます。

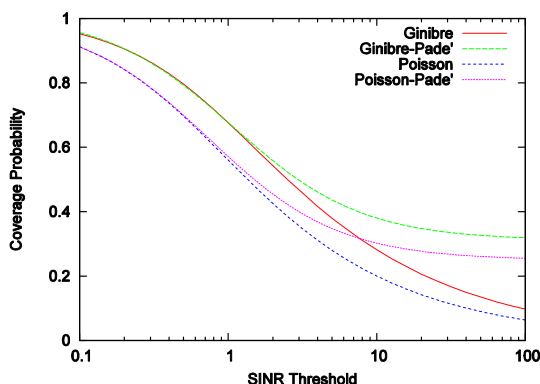


図4: 被覆確率に対する直接の数値計算と Padé 近似の比較

(3) ここまでの研究成果は、すべてセルラネットワークの下りリンク（基地局からユーザ端末への通信）に対するものでした。学会発表 では、上りリンク（ユーザ端末から基地局への通信）に対して、基地局がジニブル点過程に従って配置された空間確率モデルを提案し、下りリンクと同様、被覆確率の導出および数値計算を行いました。

(4) 無線通信においては、フェイディングやシャドウィングといった無線電波の変動を考慮しなければなりません。これまでの解析では、これにレイリーフェイディングと呼ばれる最も基本的な仮定をしていました。学会発表 ではこれを一般化し、仲上- m フェイディング ($m=1$ の場合がレイリーフェイディングに対応) を仮定したモデルの解析と数値評価を行いました。学会発表 では、ここで用いた手法をさらに一般化することにより、セルラネットワークの基地局が複数のアンテナを持つ場合の解析も行っています。図5は、基地局が定常ポアソン点過程に従っ

て配置されたモデルとジニブル点過程に従って配置されたモデルのそれぞれについて、レイリーフェイディングの場合と仲上-2 フェイディングの場合の被覆確率を比較した結果です（学会発表 より引用）。どちらも、特に SINR Threshold が比較的小さいところでは、仲上-2 フェイディングのほうが大きな被覆確率が得られていることが確認できます。

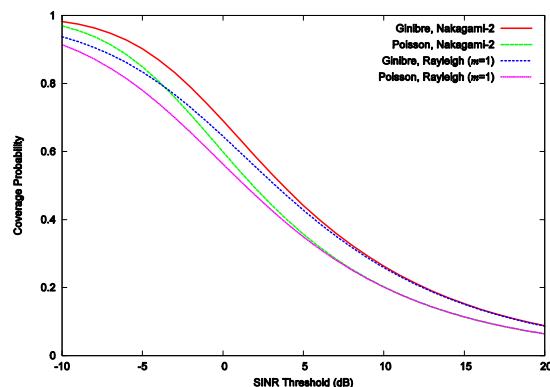


図5: レイリーフェイディングと仲上-2 フェイディングによる被覆確率の比較

他にも、次節にある通り、いくつかの関連する成果を得ました。

5. 主な発表論文等

（研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線）

〔雑誌論文〕(計 2 件)

Itaru Nakata, Naoto Miyoshi, “Spatial stochastic models for analysis of heterogeneous cellular networks with repulsively deployed base stations,” Performance Evaluation, vol. 78, 2014, pp. 7-17, 査読有

DOI: 10.1016/j.peva.2014.05.002

Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai, “A cellular network model with Ginibre configured base stations,” Advances in Applied Probability, vol. 46, 2014, pp. 832-845, 査読有

DOI: 10.1239/aap/1409319562

〔学会発表〕(計 13 件)

小林 拓矢, 三好 直人, “Downlink coverage probability in Ginibre-Poisson overlaid MIMO cellular networks,” 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」, 2016年1月21日~23日, 多摩, 東京, 査読無

Fumio Machida, Naoto Miyoshi, “An optimal stopping problem for software rejuvenation in a job processing system,” 7th International Workshop on Software Aging and Rejuvenation (WoSAR 2015),

2015年11月2日, Gaithersburg, Maryland, USA, 査読有

DOI: 10.1109/ISSREW.2015.7392059

Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai, “Downlink coverage probability in a cellular network with Ginibre deployed base stations and Nakagami-m fading channels,” 13th International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc and Wireless Networks (WiOpt 2015), 2015年5月25日~29日, Mumbai, India, 査読無 (招待講演)

DOI: 10.1109/WIOPT.2015.7151109

三好 直人, “セルラネットワークの空間確率モデル: ジニブル点過程を用いた基地局の配置,” 電子情報通信学会ネットワークシステム研究会, 2015年4月16日~17日, 飛騨高山, 査読無 (招待講演)

小林 拓矢, 三好 直人, “Average cell areas for a multi-tier cellular network with α -Ginibre deployed base stations,” 確率モデルシンポジウム, 2015年1月22日~24日, 仙台, 査読無

後藤 龍一, 三好 直人, “空間的な干渉のある無線アドホックネットワークにおける平均遅延,” 確率モデルシンポジウム, 2015年1月22日~24日, 仙台, 査読無

Takuya Kobayashi, Naoto Miyoshi, “Average cell area of heterogeneous cellular networks,” 3rd Japan-Korea Joint Workshop on Complex Communication Sciences (JKCCS'14), 2014年10月27日~28日, Busan, Korea, 査読無

Takuya Kobayashi, Naoto Miyoshi, “Uplink cellular network models with Ginibre deployed base stations,” 26th International Teletraffic Congress (ITC 26), 2014年9月9日~11日, Karlskrona, Sweden, 査読有

DOI: 10.1109/ITC.2014.6932951

三好 直人, “行列式点過程を用いたセルラネットワークのモデル化と解析,” 電子情報通信学会第3回 NetSci/CCS 研究会合同ワークショップ, 2014年8月7日~8日, 支笏湖, 北海道, 査読無 (招待講演)

Hitoshi Nagamatsu, Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai, “Padé approximation for coverage probability in cellular networks,” 10th International Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWiN 2014), 2014年5月16日, Hammamet, Tunisia, 査読無 (招待講演)

DOI: 10.1109/WIOPT.2014.6850367

Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai, “Cellular networks with α -Ginibre base stations,” Forum of Mathematics for Industry 2013, 2013年11月4日~8日, Fukuoka, 査読有

DOI: 10.1007/978-4-431-54907-9_16

Naoto Miyoshi, Itaru Nakata, “Spatial

stochastic models of heterogeneous cellular networks with repulsively deployed base stations,” 17th INFORMS Applied Probability Society Conference, 2013年7月15日~17日, San Jose, Costa Rica, 査読無

Naoto Miyoshi, “Modeling and analysis of cellular networks using the Ginibre point process,” 9th Workshop on Spatial Stochastic Models for Wireless Networks (SpaSWiN 2013), 2013年5月13日, Tsukuba Science City, 査読無 (招待講演)

〔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〕

学会誌解説

三好 直人, “セルラネットワークの空間点過程モデル,” オペレーションズ・リサーチ, vol. 59, 2014, pp. 678-683.

http://www.orsj.or.jp/archive2/or59-11/or59_11_678.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

三好 直人 (Miyoshi, Naoto)

東京工業大学・情報理工学院・教授

研究者番号: 20263121

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

白井 朋之 (Shirai, Tomoyuki)

九州大学・マス・フォア・インダストリ研

究所・教授

研究者番号: 70302932