

令和 2 年 6 月 16 日現在

機関番号：12608

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2016～2019

課題番号：16K00030

研究課題名(和文)空間確率モデルによる無線通信ネットワークの解析と性能評価

研究課題名(英文) Analysis and performance evaluation of wireless communication networks via spatial stochastic models

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の目的は、無線通信ネットワークにおける無線ノードの配置を空間点過程によって表わした空間確率モデルを考え、そのモデルの解析を通してネットワークの性能を調べることです。主な研究成果として、(1) 基地局の配置に正の相関や負の相関のある様々なセルラネットワークモデルに対して、被覆確率と呼ばれる性能指標を数値計算可能な形で導出するとともに実際に数値計算をすることによって性能評価を行ったこと、(2) 被覆確率を高速に計算できる近似手法を提案したこと、(3) さらに被覆確率の分布の裾の漸近的な特性を調べたこと等が挙げられます。

研究成果の学術的意義や社会的意義

無線通信ネットワークにおける無線ノードの位置を空間点過程を用いて表した空間確率モデルの研究は盛んに行われていますが、その多くは解析の容易さのために均質なポアソン点過程を仮定しています。しかし、実際のセルラネットワークにおける無線基地局やユーザ端末の配置には正または負の様々な相関が現れます。したがって、点配置に相関のある空間点過程を用いて無線ネットワークをモデル化し、そのモデルに対して多方面から解析を行ったことには大きな意義があると考えます。

研究成果の概要(英文)：The aim of this research is that we analyze spatial stochastic models of wireless communication networks, where the locations of wireless nodes are expressed by spatial point processes, and then investigate performance of the networks. The main results are as follows:

(1) For various cellular network models where the locations of base stations are positively or negatively correlated, we have derived the coverage probability, a primary performance measure of wireless networks, in numerically computable forms and have evaluated performance of the networks through numerical experiments. (2) We have proposed a simple approximate technique to compute the coverage probability in cellular networks. (3) We have investigated some asymptotic properties of the tail of coverage probability in cellular networks.

研究分野：応用確率論

キーワード：確率モデル 無線通信ネットワーク 空間点過程 性能解析

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初から現在に至るまで、無線通信ネットワークの性能評価のための数学モデルとして、無線ノード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)によって表した空間確率モデルの研究が盛んに行われています。これは、無線通信ネットワークにおいては、通信距離による電波の減衰(経路損失)や通信相手以外の無線ノードからの電波干渉の影響等により、その性能が無線ノードの位置関係に大きく依存する一方で、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ということに依ります。すなわち、空間点過程を用いて無線ノードの不規則な配置を表現し、そうして得られた空間確率モデルを解析することによって、無線通信ネットワークの性能を評価しようという訳です。研究開始当初における多くの既存研究では、解析の容易さのために、均質なポアソン(Poisson)点過程を用いて無線ノードの配置をモデル化することが一般的でした。これは無線ノードが互いに独立な位置にあると仮定していることになりませんが、例えば実際のセルラネットワーク(携帯移動端末等の通信ネットワーク)の無線基地局は携帯電話キャリアによって計画的に設置されており、無線ノードの配置には相関があると考えられます。そこで、研究代表者らは行列式点過程と呼ばれる、互いに反発しあう点の配置を表す空間点過程を用いたセルラネットワークのモデルを提案し、その解析を通してネットワークの性能評価を行っていました(引用文献, 等)。研究開始当初においては、この方向の研究はまだ始まったばかりであり、多くの課題が残されているという状況でした。

2. 研究の目的

本研究の目的は、それまでに研究代表者らが行ってきたセルラネットワークの空間確率モデルの研究を理論と応用の両面で発展させることによって、様々な無線通信ネットワークにおいて、無線ノードの不規則な配置がネットワークに及ぼす影響を解析的に調べることでした。例えば、これまで研究代表者らが扱ってきたモデルは、基地局と端末のそれぞれが1つのアンテナしか持たないものでした。これに対して、複数種類の基地局(強い電波で広範囲をカバーするマクロ基地局や弱い電波で狭い領域をカバーするスモール基地局等)が混在するセルラネットワークにおいては、基地局と端末の両方が複数のアンテナを持つMIMO(multi-input multi-output)モデルを考えることができます。一方で、理論的な側面では、ポアソン点過程やジニブル(Ginibre)点過程(行列式点過程の一種)などの特定の点過程を仮定しない、より一般的なモデルを考え、無線通信ネットワークの本質的な特性や数理的な構造を明らかにすることも目的の1つでした。

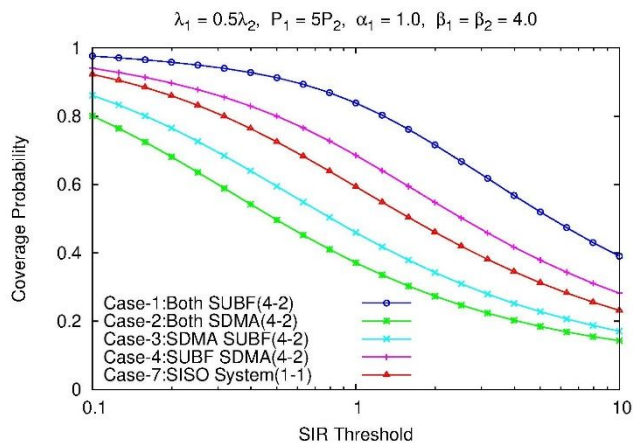
3. 研究の方法

本研究を通して、無線通信ネットワークにおける基地局やユーザ端末の配置を空間点過程によってモデル化し、そうして得られた空間確率モデルを解析するという方法を用いました。セルラネットワークの性能評価においては、様々なモデルに対して被覆確率(coverage probability)と呼ばれる性能評価指標を数値計算可能な形で導出することを目標としました。また、被覆確率を数値計算可能な形で導出できるケースに限られていること、数値計算が可能だとしても実際の計算にはかなりの時間がかかってしまうことなどから、より一般的なモデルに対して短時間で計算できる被覆確率の近似手法を提案したり、被覆確率の分布の裾の漸近的な特性を調べたりもしました。さらに、無線環境内をユーザ端末が移動する状況を考慮したモデルでは、ユーザの移動によって通信する基地局が切り替わるハンドオーバーの頻度等を解析しました。

4. 研究成果

研究成果は、大きく応用面での成果と理論面での成果に分けられます。以下では、まず応用面での成果(1)~(5)について説明し、その後で理論面での成果(6)~(8)について述べます。

(1) 学会発表1および雑誌論文1では、セルラネットワークの基地局の配置モデルとして、均質なポアソン点過程にしたがって配置される基地局とジニブル点過程にしたがって配置される基地局とが混在するものを考えました。また、各基地局が複数のアンテナをもつものとししました。このモデルに対して、被覆確率を数値計算可能な形で導出し、実際に数値計算をすることによって性能評価を行いました。これは、それまでセルラネットワークの基地局の配置をジニブル点過程によって表わしたモデルでは、各基地局がアンテナを1つしか持たないモデルしか解析されていなかったものを拡張したものです。右の図は基地局や遊座端末のアンテナの数の組合せが被覆確率に与える影響を表しています。

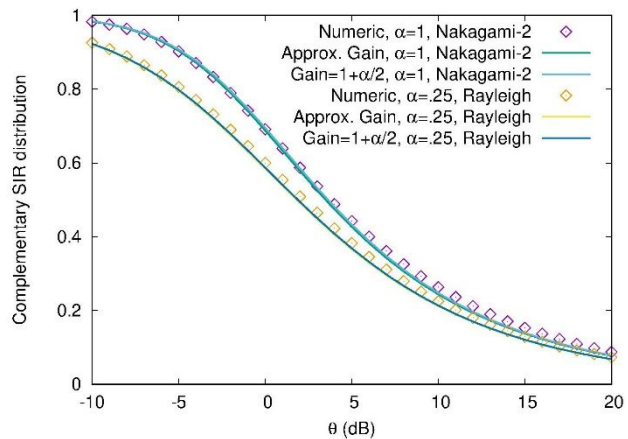


(2) 次に雑誌論文4では、無線基地局がポアソン・クラスタ点過程と呼ばれる点過程にしたがって平面上に配置されるセルラネットワークのモデルを考えました。ポアソン・クラスタ点過程と

は、点同士に正の相関のある点過程の1つであり、ユーザの多い地域に送信出力の小さい基地局が集中して設置される状況をモデル化するのに用いられます。これまで基地局の配置をポアソン・クラスタ点過程で表わしたモデルに対して被覆確率を数値計算可能な形で厳密に求めた結果はなく、この成果が世界で初めてのものです。

(3) 雑誌論文5では、送信出力が大きく広い範囲をカバーできるマクロ基地局と送信出力が小さく狭い範囲しかカバーできないスモール基地局が混在するセルラネットワークをモデル化、解析し、ネットワークの性能評価を行いました。ここでは、マクロ基地局の配置を均質なポアソン点過程によって表現する一方で、スモール基地局の配置は正の相関のある点過程を表現できるポアソン・クラスタ点過程によって表わしました。これは現実のセルラネットワークにおいて、スモール基地局が需要の大きいところに集中して配置されることを表現したものです。また、ユーザ端末の配置も基地局の配置と独立な場合、そしてスモール基地局の配置と正の相関がある場合の2通りを解析しました。

(4) 基地局の配置に正または負の相関のあるモデルでは、被覆確率を数値計算可能な形で導出できたとしても、実際の計算には多くの時間がかかってしまうことがあります。そこで、雑誌論文3では、基地局の配置に一般の定常点過程を仮定したモデルに対して、簡単かつ短時間で計算できる被覆確率の近似手法を提案し、数値実験により提案手法の有用性を検証しました。右の図は、基地局がジニブル点過程にしたがって配置されるセルラネットワークの被覆確率に対して、厳密な数値計算結果と2種類の近似手法による計算結果を比較したものであり、うまく近似できている様子を観察することができます。



(5) これまで述べた成果はすべてセルラネットワークが提供する無線環境の性能評価をしたものですが、学会発表4では無線環境内をユーザが移動する状況を考えました。無線環境内をユーザが移動する際、ユーザの位置に応じて通信する基地局が切り替わるハンドオーバーという状況が起こります。ハンドオーバーが多すぎると通信切断のリスクが大きくなる一方で、ハンドオーバーを抑制すると通信品質の劣化に繋がります。そこで、移動するユーザのハンドオーバーの頻度と通信品質とのトレードオフを評価しました。

(6) 学会発表2, 3では、セルラネットワークの基地局が一般の定常空間点過程にしたがって配置されるモデルに対して、**信号体干渉比** (signal-to-interference ratio; SIR) と呼ばれる指標の確率分布の裾の漸近解析を行いました。これは、セルラネットワークの空間確率モデルでは、信号対干渉比の確率分布を数値計算可能な形で導出できるケースは、基地局の配置を表す点過程がポアソン点過程やジニブル点過程といった特別なものである場合に限定されているため、それ以外の一般の点過程の場合にも成立する、モデルの数理的かつ本質的な構造を明らかにするための研究です。

(7) 上の成果に引き続き、雑誌論文2, 学会発表5では、セルラネットワークの空間確率モデルにおける信号対干渉比の確率分布の裾の漸近解析を行いました。(6)で述べたモデルでは、距離に応じた信号の減衰を表す関数(経路損失関数)として、べき乗関数を仮定していましたが、べき乗関数の場合、距離が0に近づくとともに信号が無限大に発散することを仮定してしまっています。そこで、有界な正則変動関数を経路損失関数として採用しました。正則変動関数はべき乗関数を一般化したものです。経路損失関数がべき乗関数のときは信号対干渉比の確率分布の裾の直接的な漸近解析が可能だったのですが、有界な正則変動関数を用いることによって直接的な漸近解析は困難になります。そこで信号対干渉比の分布の裾の対数を取り、それに対して漸近的な性質を調べるという方法を採用しました。基地局の配置を表す点過程としてポアソン点過程を仮定したときに信号対干渉比分布の裾の対数漸近上界および対数漸近下界を求め、さらに基地局の配置を表す点過程として行列式点過程を仮定したときに同様の対数漸近上界を求めました。これにより信号対干渉比分布の裾が指数的に減衰することを示すことができました。

(8) 学会発表6の成果は次の研究課題への橋渡しとなるもので、基地局が高密度に配置されるセルラネットワークを想定しています。ここでは、基地局の配置をモデル化する点過程の強度(点の密度)が限りなく大きくなったときに電波干渉を表す確率場に対してある種の中心極限定理が成り立つことを示しました。

<引用文献>

N. Miyoshi and T. Shirai, "A cellular network model with Ginibre configured base stations," *Advances in Applied Probability*, volume 46, issue 3, pp. 832-845,

September 2014.

I. Nakata and N. Miyoshi, "Spatial stochastic models for analysis of heterogeneous cellular networks with repulsively deployed base stations," *Performance Evaluation*, volume 78, pp. 7-17, August 2014.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 1件/うちオープンアクセス 2件）

1. 著者名 Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai	4. 巻 E99.B
2. 論文標題 Spatial Modeling and Analysis of Cellular Networks Using the Ginibre Point Process: A Tutorial	5. 発行年 2016年
3. 雑誌名 IEICE Transactions on Communications	6. 最初と最後の頁 2247 ~ 2255
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1587/transcom.2016NEI0001	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai	4. 巻 37
2. 論文標題 Tail asymptotics of signal-to-interference ratio distribution in spatial cellular network models	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Probability and Mathematical Statistics	6. 最初と最後の頁 431 ~ 453
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.19195/0208-4147.37.2.12	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yuta Takahashi, Yao Chen, Takuya Kobayashi, Naoto Miyoshi	4. 巻 7
2. 論文標題 Simple and Fast PPP-Based Approximation of SIR Distributions in Downlink Cellular Networks	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 898 ~ 901
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2018.2836438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Naoto Miyoshi	4. 巻 8
2. 論文標題 Downlink Coverage Probability in Cellular Networks With Poisson-Poisson Cluster Deployed Base Stations	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Wireless Communications Letters	6. 最初と最後の頁 5 ~ 8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/LWC.2018.2845377	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Chiranjib Saha, Harpreet S. Dhillon, Naoto Miyoshi, Jeffrey G. Andrews	4. 巻 18
2. 論文標題 Unified Analysis of HetNets Using Poisson Cluster Processes Under Max-Power Association	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 IEEE Transactions on Wireless Communications	6. 最初と最後の頁 3797 ~ 3812
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1109/TWC.2019.2917904	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Fumio Machida, Naoto Miyoshi	4. 巻 168
2. 論文標題 Analysis of an optimal stopping problem for software rejuvenation in a deteriorating job processing system	5. 発行年 2017年
3. 雑誌名 Reliability Engineering & System Safety	6. 最初と最後の頁 128 ~ 135
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.res.2017.05.019	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計12件 (うち招待講演 3件 / うち国際学会 7件)

1. 発表者名 Takuya Kobayashi, Naoto Miyoshi
2. 発表標題 Downlink coverage probability in Ginibre-Poisson overlaid MIMO cellular networks
3. 学会等名 WiOpt 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai
2. 発表標題 A sufficient condition for tail asymptotics of SIR distribution in downlink cellular networks
3. 学会等名 SpaSWiN 2016 (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai
2. 発表標題 On the tail asymptotics of signal-to-interference ratio distribution in downlink cellular networks
3. 学会等名 Stochastic Models V (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 Kiichi Tokuyama, Naoto Miyoshi
2. 発表標題 Data rate and handoff rate analysis for user mobility in cellular networks
3. 学会等名 IEEE WCNC 2018 (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Naoto Miyoshi, Tomoyuki Shirai
2. 発表標題 Logarithmic tail asymptotics of signal-to-interference ratio distribution in spatial stationary cellular networks with bounded and regularly varying path-loss functions
3. 学会等名 Stochastic Models VI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Takumi Aburayama, Naoto Miyoshi
2. 発表標題 Scaling limits of interference fields in spatial stochastic models of ultra-dense wireless networks
3. 学会等名 Workshop on Random Matrices, Stochastic Geometry and Related Topics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Naoto Miyoshi
2. 発表標題 Downlink coverage probability in cellular networks with Poisson-Poisson cluster deployed base stations
3. 学会等名 IEEE GLOBECOM 2018 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林 拓矢, 三好 直人, Dhillon Harpreet S.
2. 発表標題 A downlink heterogeneous cellular network model with intra- and inter-tier correlated base station locations
3. 学会等名 2018年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 徳山 喜一, 三好 直人
2. 発表標題 移動体通信における time-based なハンドオーバー制限のモデルとその解析
3. 学会等名 2018年度待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 油山 拓生, 三好 直人
2. 発表標題 行列式点過程がつくる無線干渉場の巨視的極限
3. 学会等名 待ち行列シンポジウム「確率モデルとその応用」
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 小林 拓矢, 三好 直人
2. 発表標題 Uplink coverage analysis for heterogeneous cellular networks
3. 学会等名 待ち行列シンポジウム: 確率モデルとその応用
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 高橋 雄太, 三好 直人
2. 発表標題 セルラネットワークの空間確率モデルに対するポアソン点過程近似について
3. 学会等名 待ち行列シンポジウム: 確率モデルとその応用
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	白井 朋之 (Shirai Tomoyuki) (70302932)	九州大学・マス・フォア・インダストリ研究所・教授 (17102)	