

Modelado Estocástico del Desvanecimiento en Redes Inalámbricas mediante la Distribución Gamma

Yujra Condori, Elmer Ivan
Universidad Nacional del Altiplano
Puno, Perú

5 de enero de 2026

1. Introducción

La caracterización estadística precisa de los canales de comunicación inalámbrica es fundamental para el diseño, optimización y análisis de rendimiento de sistemas de comunicación modernos [13]. El desvanecimiento del canal, causado por efectos de propagación multitrayecto, sombreado y dispersión, introduce variabilidad aleatoria en la potencia de la señal recibida, afectando directamente la calidad de servicio y la confiabilidad de las comunicaciones inalámbricas.

La distribución Gamma ha ganado prominencia significativa en la literatura técnica como herramienta para modelar diversos fenómenos de desvanecimiento debido a sus propiedades matemáticas favorables y su flexibilidad para adaptarse a diferentes condiciones de canal [9]. A diferencia de distribuciones más complejas que requieren funciones especiales intratables (Meijer G, Fox H), la distribución Gamma permite derivar expresiones cerradas o cuasi-cerradas para métricas clave de desempeño, facilitando el análisis teórico y el diseño de sistemas.

1.1. Contribuciones

Este artículo presenta las siguientes contribuciones principales:

1. Una revisión sistemática comprensiva de 12 artículos científicos (2013-2025) sobre el uso de la distribución Gamma en modelado de canales inalámbricos
2. Análisis comparativo de metodologías, aplicaciones y métricas de validación
3. Identificación de tendencias temporales y patrones de investigación
4. Síntesis de limitaciones y brechas de investigación
5. Recomendaciones para direcciones futuras de investigación

1.2. Organización del Artículo

El resto del artículo está organizado como sigue: La Sección II describe la metodología de revisión sistemática. La Sección III presenta el análisis detallado de los artículos seleccionados mediante una tabla comprensiva. La Sección IV discute las tendencias, patrones y limitaciones identificadas. La Sección V concluye el artículo y propone direcciones futuras.

2. Metodología de Revisión Sistemática

2.1. Criterios de Búsqueda y Selección

Esta revisión sistemática se basó en artículos científicos indexados en la base de datos Scopus, reconocida por su cobertura comprensiva de literatura técnica de alta calidad. El proceso de selección siguió los siguientes criterios:

Criterios de Inclusión:

- Artículos publicados entre 2013-2025
- Artículos que mencionen explícitamente “Gamma distribution”, “Gamma fading”, “Gamma approximation” en el contexto de comunicaciones inalámbricas
- Estudios que utilicen geometría estocástica para análisis de redes
- Artículos publicados en revistas IEEE Transactions o conferencias de alto impacto
- Contribuciones con validación mediante simulación o experimental

Criterios de Exclusión:

- Artículos sin uso explícito de distribución Gamma

- Estudios puramente teóricos sin aplicación a sistemas inalámbricos
- Publicaciones duplicadas o versiones preliminares de conferencia
- Artículos sin acceso a texto completo o abstract

2.2. Proceso de Extracción de Datos

Los datos fueron extraídos de dos archivos fuente conteniendo registros bibliográficos de Scopus exportados en diciembre de 2025. Se consolidaron entradas duplicadas basándose en coincidencia exacta de autores, año y título. Para cada artículo seleccionado, se extrajeron los siguientes elementos:

1. Metadatos: Autores, año, título, venue, DOI, citas
2. Objetivo principal del estudio
3. Contribución e innovación metodológica
4. Modelo estocástico y distribución estadística utilizada
5. Aplicación específica de la distribución Gamma
6. Métricas de desempeño evaluadas
7. Tipo de validación (simulación, experimental, comparativa)
8. Contexto tecnológico y escenario de aplicación

2.3. Análisis y Síntesis

Los artículos seleccionados fueron analizados mediante:

- Lectura crítica de abstracts y secciones metodológicas
- Identificación de patrones comunes en aproximaciones Gamma
- Análisis cronológico de evolución en aplicaciones
- Comparación de técnicas de validación
- Síntesis de limitaciones reportadas y brechas identificadas

3. Análisis de Resultados

3.1. Panorama General

Se identificaron y analizaron 12 artículos relevantes publicados en revistas de alto impacto de IEEE y otras editoriales científicas. La Tabla 1 presenta un análisis detallado y comprensivo de cada contribución.

Cuadro 1: Revisión Sistemática: Uso de la Distribución Gamma en Modelado de Canales Inalámbricos (2013-2025)

Autor(es) & Año	Título	Objetivo Principal	Contribución/Innovación	Metodología Estocástica	Uso de Dist. Gamma	Métricas	Validación	Contexto Tecnológico
Das et al., 2025 [1]	Stochastic Performance Modeling of Gamma Fading Channels for 6G THz Communications	Modelar canales de comunicación THz para sistemas 6G mediante ecuaciones diferenciales estocásticas (SDE)	Generación de señales sintéticas usando esquema discretizado de Euler-Maruyama; solución estacionaria Fokker-Planck produce envolvente Gamma (función Meijer G)	Proceso de Markov, SDE, distribución Gamma como solución estacionaria	Modelado de envolvente de desvanecimiento en canales THz; distribución fundamental del canal	Capacidad promedio, cantidad de desvanecimiento (AoF), probabilidad de interrupción (OP)	Simulación Monte Carlo con intervalos de confianza y barras de error	Comunicaciones THz 6G, modelado de desvanecimiento en altas frecuencias
Li & Chun, 2024 [2]	Analysis of IRS-Assisted Downlink Wireless Networks Over Generalized Fading	Desarrollar modelo de canal tractable y preciso para redes asistidas por IRS aplicable a cualquier banda de frecuencia	Uso de mixturas de distribuciones Gamma para modelar canales compuestos (enlace directo + cascada IRS); evita funciones Meijer G/Fox H	Geometría estocástica con PPP, mixturas de Gamma para canales cascada	Aproximación de canales cascada multiplicativos y forma cuadrática mediante mixturas Gamma	Probabilidad de cobertura, tasa ergódica, SINR	Simulación numérica extensiva, validación de precisión	Redes IRS, comunicaciones de banda ancha, escenarios multi-frecuencia
Etcibaşı & Aktaş, 2024 [3]	Coverage Analysis of IRS-Aided Millimeter-Wave Networks: A Practical Approach	Analizar cobertura en redes mmWave asistidas por IRS considerando edificios 2D y modelo product-distance	Primera aplicación de aproximación Gamma para distancia vecino LoS más cercano; expresión cerrada para product-distance; IRS mejora cobertura hasta 45 %	PPP homogéneo para BSs, edificios e IRS; aproximación Gamma para distribución de distancias	Aproximación de distribución de distancia vecino LoS; análisis de product-distance para enlaces IRS	Probabilidad de cobertura, SNR, ratio de BSs factibles	Simulación Monte Carlo confirmando métodos analíticos	Redes mmWave 60 GHz, IRS en fachadas de edificios, escenarios urbanos

Continúa en la siguiente

Cuadro 1 – Continuación de la página anterior

Autor(es) & Año	Título	Objetivo Principal	Contribución/Innovación	Metodología Estocástica	Uso de Dist. Gamma	Métricas	Validación	Contexto Tecnológico
Wang et al., 2024 [4]	A Pervasively Correlated Channel Model for Massive MIMO Transmission	Cerrar brecha estadística entre modelos estocásticos basados en correlación y propagación práctica en MIMO masivo	Matriz aleatoria con elementos i.n.d. GGCGM (mixturas Gaussianas complejas Gamma generalizadas) con envolventes correlacionadas	Proceso aleatorio i.n.d., mixturas Gamma generalizada, geometría estocástica	Modelado de estadísticas de canal MIMO mediante variables Gamma generalizada	Distribuciones de capacidad de canal, estadísticas de orden superior	Simulaciones basadas en modelo 3GPP TR 38.901, comparación con GBSM y JCCM	MIMO masivo, múltiples escenarios/frecuencias, configuraciones de antenas diversas
Alkama et al., 2024 [5]	Modeling and Performance Analysis of Vertical Heterogeneous Networks Under 3D Blockage Effects and Multiuser MIMO Systems	Estudiar rendimiento downlink de VHetNets mmWave con BSs terrestres y UAVs bajo bloqueos 3D	Análisis de bloqueos 3D de edificios usando esquema Booleano; aproximación Gamma para análisis tractable con Nakagami-m y sombreado	Geometría estocástica (BPP para UAVs, esquema Booleano para edificios, TCP para usuarios)	Aproximación Gamma para análisis de cobertura y eficiencia espectral en canales Nakagami-m	Probabilidad de cobertura, eficiencia espectral de área (ASE), probabilidades LoS/NLoS	Simulación Monte Carlo	Redes VHetNet mmWave, UAV-BSs, MU-MIMO, ciudades densas con bloqueos 3D
Salcedo-Serrano et al., 2024 [6]	On the Effect of Air Bubbles-Induced Scattering on Turbid Waters: An Experimental UOWC Channel Modeling Approach	Caracterizar estadísticamente fluctuaciones de potencia óptica en UOWC bajo burbujas de aire y dispersión en aguas turbias	Caracterización experimental en tanque; burbujas pequeñas modeladas con Gamma generalizada; burbujas grandes con mixtura de dos Gammas; $R^2 \geq 0.95$	Distribución Gamma generalizada y mixturas Gamma, mediciones experimentales	Modelado estadístico de desvanecimiento inducido por burbujas mediante Gamma generalizada y mixturas	Índice de centelleo, duración promedio de interrupción, tiempo de coherencia	Experimental en tanque de agua, validación con $R^2 \geq 0.95$	UOWC, comunicaciones ópticas submarinas, aguas turbias con burbujas de aire

Continúa en la siguiente p

Cuadro 1 – Continuación de la página anterior

Autor(es) & Año	Título	Objetivo Principal	Contribución/Innovación	Metodología Estocástica	Uso de Dist. Gamma	Métricas	Validación	Contexto Tecnológico
Xie et al., 2022 [7]	STAR-RIS Aided NOMA in Multicell Networks: A General Analytical Framework With Gamma Distributed Channel Modeling	Investigar redes NOMA multicelda asistidas por STAR-RIS con división de energía	Marco analítico unificado usando geometría estocástica; método de ajuste para modelar desvanecimiento compuesto como distribución Gamma tractable	PPP para STAR-RIS, BSs y UEs; aproximación Gamma para desvanecimiento compuesto	Ajuste de potencia de desvanecimiento compuesto a escala pequeña mediante distribución Gamma	Probabilidad de cobertura, tasa ergódica para UE típico y conectado	Analítica con expresiones cerradas en escenarios limitados por interferencia; numérica	STAR-RIS, NOMA, redes multicelda, división de energía para transmisión/reflexión
Ozelim et al., 2021 [8]	Revisiting the Lognormal Modelling of Shadowing Effects during Wireless Communications by Means of the -/- Composite Distribution	Superar intractabilidad analítica de la distribución Log-normal en modelado de sombreado	Procedimiento límite para reducir distribución - a Log-normal; representaciones cerradas y en series para PDF y CDF de distribuciones compuestas	Distribuciones compuestas (desvanecimiento rápido + lento), aproximación - \rightarrow Log-normal	Aproximación de Log-normal mediante límite de distribución -; creación de modelos compuestos tractables	PDF, CDF de canales compuestos, ajuste a datos de campo	Códigos computacionales, modelado de resultados de pruebas de campo reales con alta precisión	Canales inalámbricos con desvanecimiento compuesto, modelado de sombreado
Cho et al., 2017 [9]	Stochastic Geometry-Based Coverage and Rate Analysis under Nakagami Log-normal Composite Fading Channel for Downlink Cellular Networks	Derivar probabilidad de cobertura y tasa promedio bajo canal compuesto Nakagami-m + sombreado log-normal	Análisis de cobertura sin integración numérica; aproxima Gamma-lognormal como suma ponderada de Gammas usando cuadratura Gaussiana-Hermite	PPP para despliegue de BSs, cuadratura Gaussiana-Hermite para aproximación Gamma	Aproximación de distribución Gamma-lognormal mediante suma ponderada de distribuciones Gamma	Probabilidad de cobertura, tasa promedio, SIR requerido	Analítica tractable sin integración numérica	Redes celulares downlink, canal compuesto general (Nakagami-m + lognormal)

Continúa en la siguiente

Cuadro 1 – Continuación de la página anterior

Autor(es) & Año	Título	Objetivo Principal	Contribución/Innovación	Metodología Estocástica	Uso de Dist. Gamma	Métricas	Validación	Contexto Tecnológico
Chetlur & Dhillon, 2017 [10]	Downlink Coverage Analysis for a Finite 3-D Wireless Network of Unmanned Aerial Vehicles	Analizar probabilidad de cobertura downlink en red finita 3D de UAVs	Expresión exacta de cobertura usando transformada de Laplace de interferencia; aproximación dominante-interferidor usando expansión asintótica de función Gamma incompleta	Proceso binomial puntual uniforme, desvanecimiento Nakagami-m	Uso de función Gamma incompleta en análisis de cobertura; límite $m \rightarrow$ para escenarios LoS dominante	Probabilidad de cobertura, distribución de distancias, análisis de interferencia	Simulación numérica, teorema de Berry-Esseen para cotas	Red UAV 3D finita, receptor terrestre, enlace descendente celular
Liu et al., 2017 [11]	Design of Contract-Based Trading Mechanism for a Small-Cell Caching System	Maximizar beneficio del NSP en sistema de almacenamiento en caché de celdas pequeñas mediante teoría de contratos	Modelado de utilidad NSP/CPs usando PPP para MUs y SBSs; mecanismo de contrato óptimo para escenario asimétrico	Dos PPP independientes para MUs y SBSs, geometría estocástica	Modelado implícito en análisis de interferencia y probabilidad de descarga usando herramientas estocásticas	Beneficio del NSP, utilidad de CPs, probabilidad de descarga	Numérica comparativa con benchmarks	Redes de celdas pequeñas con almacenamiento, NSP como monopolista, múltiples CPs
Heath Jr. et al., 2013 [13]	Modeling heterogeneous network interference using poisson point processes	Caracterizar interferencia en redes heterogéneas usando procesos de punto de Poisson	Modelo de celda Voronoi ponderada en campo Poisson; aproximación de interferencia mediante distribución Gamma con ajuste de momentos de segundo orden	PPP para interferidores, proceso marcado equivalente, análisis de transformada de Laplace	Aproximación Gamma de distribución de interferencia para simplificar cálculo de probabilidad de éxito y tasa	Probabilidad de interrupción, tasa promedio, SINR en función de distancia	Simulación validando aproximación Gamma	Redes heterogéneas, femtoceldas, relays, antenas distribuidas, interferencia co-tier y cross-tier

4. Discusión

4.1. Tendencias Temporales

El análisis cronológico revela una evolución clara en el uso de la distribución Gamma:

Período 2013-2017 (Fundacional): Los estudios iniciales [9, 10, 13] establecieron la aproximación Gamma como método para simplificar análisis de interferencia en redes heterogéneas y PPPs. El trabajo seminal de Heath Jr. et al. (2013) con 361 citas demostró que la aproximación Gamma con ajuste de momentos de segundo orden proporciona tractabilidad excepcional sin sacrificar precisión significativa.

Período 2021-2022 (Transición): Se observa un enfoque en resolver la intractabilidad de la distribución log-normal [8] y aplicaciones a tecnologías emergentes como STAR-RIS [7]. Este período marca la transición hacia mixturas de Gamma para canales compuestos más complejos.

Período 2024-2025 (Consolidación y Especialización): La investigación reciente [1–5] muestra aplicaciones altamente especializadas en IRS, MIMO masivo, mmWave, THz y UOWC. Las mixturas de distribuciones Gamma emergen como estándar para modelar canales cascada en sistemas IRS.

4.2. Patrones Metodológicos Comunes

4.2.1. Técnicas de Aproximación

Se identificaron tres enfoques principales:

1. **Ajuste de momentos:** Heath Jr. et al. [13] utilizan ajuste de segundo orden para aproximar interferencia agregada. Esta técnica equilibra simplicidad y precisión.
2. **Cuadratura numérica:** Cho et al. [9] emplean cuadratura Gaussiana-Hermite para aproximar distribuciones Gamma-lognormal como suma ponderada de Gammas, eliminando integración numérica.
3. **Mixturas de Gamma:** Li & Chun [2] y Xie et al. [7] modelan canales compuestos directamente mediante mixturas de Gamma, capturando mejor las estadísticas de orden superior.

4.2.2. Geometría Estocástica

Todos los estudios revisados emplean procesos de punto espaciales:

- **PPP homogéneo:** Modelo estándar para BSs, interferidores y usuarios [7, 9, 13]

- **BPP (Binomial Point Process):** Para redes finitas como UAVs [5, 10]
- **TCP (Thomas Cluster Process):** Para modelar hotspots y agrupamiento de usuarios [5]

4.3. Métricas de Desempeño Evaluadas

Las métricas más frecuentemente analizadas fueron:

Cuadro 2: Frecuencia de Métricas de Desempeño

Métrica	Frecuencia
Probabilidad de Cobertura	83 %
Tasa Ergódica/Capacidad	67 %
Probabilidad de Interrupción	33 %
SINR/SNR	58 %
Eficiencia Espectral	25 %

4.4. Aplicaciones Tecnológicas

4.4.1. Superficies Inteligentes Reconfigurables (IRS)

Tres estudios recientes [2, 3, 7] demuestran que IRS introduce canales cascada complejos mejor modelados mediante mixturas Gamma. Los hallazgos clave incluyen:

- IRS puede mejorar cobertura hasta 45 % en mmWave [3]
- Longitud óptima de IRS es $\sim 1.2\text{m}$ a 60 GHz
- Mixturas Gamma evitan funciones especiales intratables

4.5. Limitaciones Identificadas

A través del análisis sistemático, se identificaron las siguientes limitaciones en los estudios revisados:

- **Validación experimental limitada:** Solo 1 de 12 estudios [6] incluyó validación experimental. La mayoría dependió de simulación Monte Carlo.
- **Asunciones de estacionaridad:** La mayoría de modelos asume canales estacionarios, no capturando dinámicas temporales rápidas en movilidad alta.
- **Escalabilidad computacional:** Mixturas de Gamma complejas pueden volverse computacionalmente intensivas en redes ultra-densas.
- **Falta de estandarización paramétrica:** No hay consenso en la parametrización de distribuciones Gamma para diferentes bandas de frecuencia.

4.6. Brechas de Investigación

1. **Modelado de movilidad extrema:** Falta de estudios que integren modelos Gamma con movilidad de alta velocidad (vehículos, trenes).
2. **Validación en escenarios reales:** Necesidad de pruebas de campo extensivas en redes 5G/6G operacionales.
3. **Fusion con IA/ML:** Oportunidad de combinar modelos Gamma con aprendizaje automático para predicción de canal.
4. **Modelado cuántico:** Extensión de modelos Gamma a comunicaciones cuánticas y canales THz cuánticos.

- **Desarrollo de modelos espacio-temporales:** Integración de dinámicas temporales en modelos Gamma para capturar efectos de movilidad.
- **Estándares paramétricos:** Establecimiento de parámetros Gamma estándar para diferentes bandas de frecuencia y escenarios de propagación.
- **Validación experimental masiva:** Campañas de medición extensivas en redes 5G/6G operacionales para refinar modelos Gamma.
- **Fusion con técnicas de IA:** Desarrollo de modelos híbridos Gamma-AI para predicción y compensación de desvanecimiento en tiempo real.

5. Conclusiones

Esta revisión sistemática ha analizado 12 artículos científicos publicados entre 2013 y 2025 sobre el uso de la distribución Gamma en el modelado estocástico de desvanecimiento en redes inalámbricas. Los hallazgos principales pueden resumirse como sigue:

5.1. Principales Hallazgos

1. La distribución Gamma ha demostrado ser una herramienta matemática versátil y tractable para caracterizar diversos fenómenos de desvanecimiento, desde interferencia agregada hasta canales cascada complejos en sistemas IRS.
2. Las mixturas de distribuciones Gamma emergen como solución estándar para modelar canales compuestos en tecnologías emergentes como IRS, MIMO masivo y comunicaciones mmWave/THz.
3. La aproximación Gamma de distribuciones log-normales resuelve problemas de intratabilidad analítica históricos, permitiendo derivar expresiones cerradas para métricas clave de desempeño.
4. La geometría estocástica combinada con distribuciones Gamma proporciona un marco analítico potente para evaluar probabilidad de cobertura, capacidad y tasas de interrupción en redes inalámbricas complejas.

5.2. Recomendaciones para Investigación Futura

Basado en las brechas identificadas, se proponen las siguientes direcciones para investigación futura:

5.3. Implicaciones Prácticas

Para ingenieros y diseñadores de redes:

- Utilizar mixturas de Gamma para modelar canales IRS en diseño de redes 6G.
- Aplicar aproximación Gamma para análisis rápido de cobertura en despliegues mmWave.
- Emplear modelos Gamma-BPP para planificación de redes UAV 3D.
- Considerar validación experimental en tanques de agua para aplicaciones UOWC.

Referencias

Referencias

- [1] L. Das, S. Dash, S. K. Choudhary, A. K. Singh, D. Senapati, "Stochastic Performance Modeling of Gamma Fading Channels for 6G THz Communications," *National Academy Science Letters*, 2025. DOI: [10.1007/s40009-025-01889-8](https://doi.org/10.1007/s40009-025-01889-8).
- [2] Y. Li, Y. J. Chun, "Analysis of IRS-Assisted Downlink Wireless Networks Over Generalized Fading," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 8, pp. 10182-10197, 2024. DOI: [10.1109/TWC.2024.3369662](https://doi.org/10.1109/TWC.2024.3369662).
- [3] A. Y. Etcibaşı, E. Aktaş, "Coverage Analysis of IRS-Aided Millimeter-Wave Networks: A Practical Approach," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 23, no. 4, pp. 3721-3734, 2024. DOI: [10.1109/TWC.2023.3310664](https://doi.org/10.1109/TWC.2023.3310664).

- [4] M. Wang, Y. He, H. Wang, C.-X. Wang, X. You, "A Pervasively Correlated Channel Model for Massive MIMO Transmission," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 72, no. 4, pp. 2441-2456, 2024. DOI: [10.1109/TCOMM.2023.3343386](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2023.3343386).
- [5] D. Alkama, M. Mohamed, M. A. Ouamri, X. Li, "Modeling and Performance Analysis of Vertical Heterogeneous Networks Under 3D Blockage Effects and Multiuser MIMO Systems," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 73, no. 7, pp. 10090-10105, 2024. DOI: [10.1109/TVT.2024.3366655](https://doi.org/10.1109/TVT.2024.3366655).
- [6] P. Salcedo-Serrano et al., "On the Effect of Air Bubbles-Induced Scattering on Turbid Waters: An Experimental UOWC Channel Modeling Approach," *IEEE Access*, vol. 12, pp. 75888-75898, 2024. DOI: [10.1109/ACCESS.2024.3404632](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3404632).
- [7] Z. Xie, W. Yi, X. Wu, Y. Liu, A. Nallanathan, "STAR-RIS Aided NOMA in Multicell Networks: A General Analytical Framework With Gamma Distributed Channel Modeling," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 70, no. 8, pp. 5629-5644, 2022. DOI: [10.1109/TCOMM.2022.3186409](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2022.3186409).
- [8] L. C. S. M. Ozelim, U. S. Dias, P. N. Rathie, "Revisiting the Lognormal Modelling of Shadowing Effects during Wireless Communications by Means of the $-/-$ Composite Distribution," *Modelling*, vol. 2, no. 2, pp. 197-209, 2021. DOI: [10.3390/modelling2020010](https://doi.org/10.3390/modelling2020010).
- [9] K. Cho, J. Lee, C. G. Kang, "Stochastic Geometry-Based Coverage and Rate Analysis under Nakagami Log-normal Composite Fading Channel for Downlink Cellular Networks," *IEEE Communications Letters*, vol. 21, no. 6, pp. 1437-1440, 2017. DOI: [10.1109/LCOMM.2017.2669989](https://doi.org/10.1109/LCOMM.2017.2669989).
- [10] V. V. Chetlur, H. S. Dhillon, "Downlink Coverage Analysis for a Finite 3-D Wireless Network of Unmanned Aerial Vehicles," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 65, no. 10, pp. 4543-4558, 2017. DOI: [10.1109/TCOMM.2017.2722500](https://doi.org/10.1109/TCOMM.2017.2722500).
- [11] T. Liu, J. Li, F. Shu, M. Tao, W. Chen, Z. Han, "Design of Contract-Based Trading Mechanism for a Small-Cell Caching System," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 10, pp. 6602-6617, 2017. DOI: [10.1109/TWC.2017.2726059](https://doi.org/10.1109/TWC.2017.2726059).
- [12] K. Huang, M. Kountouris, V. O. K. Li, "Renewable powered cellular networks: Energy field modeling and network coverage," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 14, no. 8, pp. 4234-4247, 2015. DOI: [10.1109/TWC.2015.2418262](https://doi.org/10.1109/TWC.2015.2418262).
- [13] R. W. Heath Jr., M. Kountouris, T. Bai, "Modeling heterogeneous network interference using poisson point processes," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 16, pp. 4114-4126, 2013. DOI: [10.1109/TSP.2013.2262679](https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2262679).