

Lehrstuhl für Kommunikationsnetze
Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld

Selbstorganisierende Minimierung der Interferenz von Femtozellen in heterogenen Netzen durch zufällige Frequenzsprungverfahren

Genehmigte Dissertation
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik
der Technischen Universität Dortmund

von
Dipl.-Ing. Markus Putzke
aus Bochum

Hauptreferent:	Prof. Dr.-Ing. Christian Wietfeld
Korreferent:	Prof. Dr.-Ing. Thomas Kaiser
Dissertation eingereicht am:	23. Juli 2014
Tag der mündlichen Prüfung:	17. Dezember 2014

Dortmunder Beiträge zu Kommunikationsnetzen und -systemen

Band 9

Markus Putzke

**Selbstorganisierende Minimierung der
Interferenz von Femtozellen in heterogenen Netzen
durch zufällige Frequenzsprungverfahren**

D 290 (Diss. Technische Universität Dortmund)

Shaker Verlag
Aachen 2015

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Dortmund, Technische Univ., Diss., 2014

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3693-0

ISSN 1867-4879

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Bedingt durch stetig wachsende Anforderungen an das Verkehrsaufkommen in mobilen Netzen kommen die heutzutage eingesetzten Übertragungstechnologien innerhalb von Makrozellen an ihre Kapazitätsgrenzen. Ein vielversprechender Ansatz, um das Verkehrsvolumen in mobilen Netzen weiter zu steigern, ist der Einsatz von Kleinstzellen, sogenannten Femtozellen, die das lizenzierte Spektrum von Makrozellen wiederverwenden und in Kombination mit ihrem begrenzten Radius einen hohen Räummultiplex erzielen. Femtozellen werden typischerweise durch Endnutzer an zufälligen Orten positioniert und zu zufälligen Zeiten aktiviert. Die Wiederverwendung von Frequenzen zusammen mit der Zufälligkeit in Raum und Zeit führt zu Interferenzen sowohl zwischen Makro- und Femtozellen als auch zwischen verschiedenen Femtozellen, die nicht im Rahmen einer Netzplanung, sondern nur mit selbstorganisierenden Methoden berücksichtigt werden können. Die in der Literatur vorhandenen Lösungen beruhen vielfach auf dynamischen Ressourcenkoordinationen zwischen Nutz- und Störzellen, indem die Femtozelle ihre Interferenzumgebung mittels Abtastung der Luftschnittstelle am Access Point oder durch Messreporte der Nutzer erkundet.

In dieser Arbeit wird eine selbstorganisierende Frequenzvergabe zur Integration von *Orthogonal Frequency Division Multiple Access*-Femtozellen in heterogene Netze vorgestellt, die weder eine Interferenzerkundung noch eine Koordination zwischen Zellen benötigt. Die Idee beruht auf zufälligen Frequenzsprungverfahren innerhalb von Femtozellen, um permanente Interferenzen mit Makrozellen und anderen Femtozellen zu vermeiden. Die Makrozellen sind davon unberührt und verwenden weiterhin statische Trägerfrequenzen. Situationen in denen solche Verfahren einen Vorteil erzielen, sind Initialisierungsphasen von Femtozellen, in denen die Interferenzumgebung noch unbekannt ist (wie z.B. nach einem Netzzusammenbruch um schnellstmöglich mit Femtozellen abgeschnittene Bereiche wieder zu versorgen), als auch Szenarien, in denen sich die Interferenzumgebung sehr schnell ändert, wie z.B. bei mobilen Femtozellen. Ein weiteres Anwendungsszenario ergibt sich wenn keine Koordination zwischen verschiedenen Femtozellen vorliegt und gleichzeitig Messreporte zur Interferenzerkundung nicht übertragbar bzw. nur sehr eingeschränkt nutzbar sind. In der Literatur existieren Ansätze zu zufälligen Frequenzsprungverfahren in Femtozellen, die jedoch alle auf diskreten Trägerfrequenzen im Abstand ganzer *Resource-Blöcke* basieren. Als Folge ist die Überlagerungsbandbreite zwischen Nutz- und Störzelle immer ein Vielfaches des Zwölffachen Unterträgerabstandes. In dieser Arbeit wird gezeigt, dass die mittlere Interferenz zufälliger Frequenzsprungverfahren gesenkt werden kann, wenn eine Teilüberlagerung von *Resource-Blöcken* im Frequenzbereich ermöglicht wird. Zu diesem Zweck erlauben wir, dass die zufälligen Trägerfrequenzen der Femtozellen jeden Unterträger belegen dürfen (Frequenzsprungverfahren auf Unterträgerbasis). Ein solches Vorgehen ermöglicht einerseits eine

verbesserte Erkundung der Interferenzumgebung während Initialisierungsphasen von Femtozellen und andererseits eine direkte Übertragung von sicherheitskritischen Daten zwischen sich schnell bewegenden Fahrzeugen (*Car-to-Car Kommunikation*), ohne die sich schnell ändernde Interferenzumgebung als Resultat hoher Geschwindigkeiten erfassen zu müssen. Herkömmliche zufällige Frequenzsprungverfahren auf *Resource-Block*-Basis vermögen die Interferenz zu mitteln, während solche auf Unterträgerbasis diese zusätzlich senken können.

Zur quantitativen Leistungsbewertung zufälliger Frequenzsprungverfahren auf Unterträgerbasis werden analytische Modelle für das Signal-zu-Interferenz- und-Rausch-Verhältnis, die Bitfehlerwahrscheinlichkeit, die Ausfallwahrscheinlichkeit, den Durchsatz und die spektrale Effizienz hergeleitet. Um den Freiheitsgrad der Frequenzsprungverfahren zu erhöhen, können für die Trägerfrequenzen unterschiedliche Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen definiert werden, d.h. die Trägerfrequenzen werden als Zufallswerte der jeweils vorgegebenen Dichte generiert. Alle analytischen Modelle erfassen den Mobilfunkkanal in Form einer mittleren Pfaddämpfung, eines schnellen Schwundes (Rayleigh, Rice oder Nakagami-q) und eines langsamen Schwundes (Log-normal).

Als Erweiterung wird eine Kombination aus zufälligen Frequenzsprungverfahren und dynamischem *Fractional Frequency Reuse* vorgestellt, bei der verschiedene Nutzergruppen innerhalb der Femto- und Makrozellen unterschiedliche, zum Teil orthogonale, Wahrscheinlichkeitsdichten der Trägerfrequenzen verwenden. Auf diese Weise kann eine weitere Reduktion der Interferenzleistung erzielt werden. Zum Zwecke der Leistungsbewertung des kombinierten Verfahrens werden die analytischen Modelle entsprechend erweitert.

Alle Ergebnisse der analytischen Modelle werden mit Simulationen verifiziert. Die Resultate zufälliger Frequenzsprungverfahren auf Unterträgerbasis werden mit denen von Frequenzsprungverfahren auf *Resource-Block*-Basis, mit Systemen, die eine perfekte Kenntnis der Interferenzumgebung besitzen und mit Systemen, die eine permanente Überlagerung von Stör- und Nutzsystem liefern, verglichen. Die Ergebnisse werden als Funktion der Entfernung zwischen Femtozellnutzer und Access Point, der Makrozellgröße, der Verkehrslasten, der Eigenschaften des Mobilfunkkanals, des Doppler-Effekts und der digitalen Modulation analysiert. Dabei werden vier Interferenzszenarien diskutiert: Störung eines Femtozellnutzers im Downlink, eines Femtozell Access Points im Uplink, eines Makrozellnutzers im Downlink und einer Makrozell-Basisstation im Uplink. Es wird gezeigt, dass zufällige Frequenzsprungverfahren auf Unterträgerbasis, die Interferenzleistung von Femto- und Makrozellen um bis zu 50% und die Bitfehlerwahrscheinlichkeit um bis zu 35% gegenüber bekannten Sprungverfahren auf *Resource-Block*-Basis, durch eine Orthogonalität in der IQ-Ebene für BPSK-Modulationen, senken können. Darüber hinaus wird nicht nur die Reduktion der Interferenzleistung, sondern auch eine mögliche Reduktion der Sendeleistung untersucht.

Abstract

Due to the tremendously increasing data traffic in cellular networks, existing macrocells are no longer able to sustain the required growth. A promising solution to this shortage is the deployment of small cells, so-called femtocells, which are integrated into existing macrocells in order to offload excessive traffic. Femtocells make use of the licensed spectrum of macrocells, such that combined with limited coverage areas, a high spatial reuse of frequencies is achieved. Moreover, femtocells are typically installed by end users, which results in random activity in time and space, seen from an operator's point of view. The reuse of frequencies, in combination with random activity and short distances between macrocell base stations, femtocell access points and their users, results in Inter-Cell Interference not only between femto- and macrocells, but also between different femtocells. In order to mitigate such kinds of interference, a self-organizing integration of femtocells is required. Existing approaches typically instruct femtocells to capture their interference environment regularly, i.e. to detect the allocated resources of neighbouring cells by sensing the air interface at the access point or by collecting measurement reports of their users, such that a dynamic resource allocation is possible in order to mitigate Inter-Cell Interference.

In this work, a self-organizing frequency allocation for *Orthogonal Frequency Division Multiple Access* (OFDMA)-femtocells is presented, which neither requires knowledge of the interference environment nor an information exchange between different cells. The idea here is that femtocells use random carrier frequencies across time, i.e. that permanent blocking caused by interferences is prevented by random frequency hopping. To avoid changes in the random access network of macrocells, random frequency hopping is restricted to femtocells. Situations in which random frequency hopping is beneficial are initialization phases of femtocells where knowledge about resource allocation of neighbouring cells is not yet available (e.g. in case of black-out recovery, when macro-cellular infrastructure fails and coverage, respectively capacity, have to be provided by femtocells as soon as possible), as well as scenarios where the interference environment changes very quickly, as with mobile femtocells. Another scenario is given when no coordination between different femtocells exists and measurement reports are limited or not available to explore the interference environment. There are a few works which suggest to use random frequency hopping in femtocells, by selecting random carrier frequencies from a discrete grid based on resource-blocks. This means that differences between carrier frequencies of femto- and macrocells are always given by multiples of 12 times the subcarrier spacing. In this work, it is shown that such hopping systems are not optimal even when the interference environment is completely unknown, as the mean interference of frequency hopping in OFDMA-networks can be further reduced if each subcarrier is allowed to be selected as a random carrier frequency. This new

approach allows to enhance the exploration of the interference environment during femtocell initialization, as well as to realize direct transmission of safety-critical Car-to-Car communications with low latency and without need to scan the interference environment for fast changes in the context of high velocities. Conventional random frequency hopping based on a resource-block grid is only able to average the interference, whereas random frequency hopping based on a subcarrier grid can reduce the interference in addition to that.

In order to analyze the performance gain of random frequency hopping based on a subcarrier grid compared to random frequency hopping based on a resource-block grid, analytical models for the Signal-to-Interference-and-Noise Ratio, the Bit Error Probability, the Outage Probability, the throughput and the Spectral Efficiency are derived. Thereby, random carrier frequencies can be realized according to different probability density functions in order to allow diverse hopping strategies. All analytical models are able to characterize the mobile radio channel by different path loss models, fast fading in terms of Rayleigh, Rice or Nakagami- q as well as log-normal fading.

The presented approach is enhanced by combining random frequency hopping with Fractional Frequency Reuse. Thereby, users of femto- and macrocells are separated into different groups, which allows to assign (quasi-) orthogonal probability density functions for random carrier frequencies to users who suffer from high interference. In this way, the Inter-Cell Interference can be further reduced compared to standalone random frequency hopping. In order to quantify this, the analytical models are extended properly.

All results of the analytical models are validated by independent simulations. The results of random frequency hopping based on a subcarrier grid are compared to those of random frequency hopping based on a resource-block grid, as well as systems having perfect knowledge of the interference environment and systems assigning the same subcarriers to femto- and macrocell users. The gain of random frequency hopping based on a subcarrier grid is analyzed regarding the distance between the femtocell user and its access point, the macrocell size, the traffic load in femto- and macrocells, the characteristics of the mobile radio channel, the Doppler effect, and the digital modulation. In this context four scenarios are discussed: interference of a femtocell user in the downlink, interference of a femtocell access point in the uplink, interference of a macrocell user in the downlink and interference of a macrocell base station in the uplink. It is shown that random frequency hopping based on a subcarrier grid is able to reduce the interference power of femto- and macrocells up to 50% and the bit error probability up to 35% compared to known random frequency hopping based on a resource-block grid due to an orthogonality in the constellation plane for BPSK modulations. Not only the interference reduction is analyzed, but also the reduction of transmission power resulting from the presented approach.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung	III
Abstract	V
Abbildungsverzeichnis	IX
Abkürzungsverzeichnis	XV
Symbolverzeichnis	XIX
1 Zielsetzung und Motivation: Notwendigkeit von Femtozellen	1
2 Grundlagen der Netzplanung	13
2.1 Charakterisierung des Mobilfunkkanals	13
2.2 Orthogonal Frequency Division Multiple Access	26
2.3 Inter-Cell-Interferenz bei Makrozellen	37
3 Integration von Femtozellen	47
3.1 Existierende Ansätze zur Interferenzvermeidung	47
3.1.1 Koordinationsansätze	48
3.1.2 Verfahren im Zeitbereich	52
3.1.3 Verfahren im Frequenzbereich	54
3.1.4 Verfahren mit dynamischen Ressourcenzuweisungen	63
3.1.5 Autonome Verfahren	68
3.1.6 Verfahren mit Sendeleistungssteuerung	73
4 Zufällige Frequenzsprungverfahren	77
4.1 Prinzip und Wirkungsweise	77
4.2 Definition von Szenarien	91
4.3 Analytisches Modell für das Signal-zu-Stör-Verhältnis SINR	96
4.3.1 Störung der Femtozelle	101
4.3.2 Störung der Makrozelle	114
4.3.3 Benötigte Sendeleistung	116
4.4 Analytisches Modell für die Bitfehlerwahrscheinlichkeit BEP	118
4.4.1 Störung der Femtozelle	118
4.4.2 Störung der Makrozelle	126

4.4.3	Benötigte Sendeleistung	127
4.5	Analytische Modelle für Durchsatz und spektrale Effizienz	130
4.6	Analytisches Modell für die Ausfallwahrscheinlichkeit	131
4.6.1	Störung der Femtozelle	133
4.6.2	Störung der Makrozelle	138
5	Kombination aus Frequenzsprungverfahren und FFR	139
5.1	Prinzip der Kombination	139
5.2	Wahrscheinlichkeitsdichten der Frequenzdifferenzen	146
5.2.1	Gleichverteilte Trägerfrequenzen	146
5.2.2	Gaussverteilte Trägerfrequenzen	153
5.3	Anpassungen der analytischen Modelle	162
6	Leistungsbewertung der zufälligen Frequenzsprungverfahren	167
6.1	Simulation	167
6.2	Zufällige Frequenzsprungverfahren auf Unterträgerbasis	171
6.2.1	Signal-zu-Stör-Verhältnis in Femtozellnetzen	174
6.2.2	Bitfehlerwahrscheinlichkeit in Femtozellnetzen	204
6.2.3	Durchsatz und spektrale Effizienz in Femtozellnetzen	216
6.2.4	Ausfallwahrscheinlichkeit in Femtozellnetzen	221
6.3	Kombination aus zufälligen Frequenzsprungverfahren und FFR	226
6.4	Weiterführende Simulationen	241
6.4.1	Änderung der digitalen Modulation	241
6.4.2	Einsatz von SC-FDMA im Uplink	252
6.4.3	Einfluss der Phase des Mobilfunkkanals	254
6.4.4	Berücksichtigung der Dopplerverbreiterung	260
6.4.5	Netz aus mehreren Femtozellen	262
6.5	Abschließende Ergebnisübersicht	271
7	Zusammenfassung	275
	Literaturverzeichnis	279