

DISS. ETH NO. 19173

CRYSTALLIZATION AND NONCOHERENCE IN WIRELESS COMMUNICATION

A dissertation submitted to

ETH ZURICH

for the degree of

Doctor of Sciences

presented by

VENIAMIN I. MORGENSHTERN

Dipl. Math., Saint-Petersburg State University

born 23.06.1982

citizen of Russia

accepted on the recommendation of

Prof. Dr. Helmut Bölcskei, examiner

Prof. Dr. İ. Emre Telatar, coexaminer

Prof. Dr. Amos Lapidoth, coexaminer

2010

Abstract

Channel capacity determines the largest amount of data that can be reliably transmitted per second over a communication channel. Finding the capacity of a *wireless* channel is a difficult problem because of the presence of two effects: the effect of *interference* and the effect of *fading*. When analyzing fading channels, it is common to assume that the receiver knows the channel state perfectly, i.e., a *genie* provides channel state information (CSI) to the receiver. This scenario is referred to as the *coherent* fading channel. However, in practical wireless systems such CSI must constantly be acquired and updated. To characterize the cost of acquiring CSI fundamentally, one needs to study the capacity of the fading channel in the setting when *no* CSI is available at the receiver; this scenario is referred to as the *noncoherent* fading channel.

Part I of this thesis is devoted to studying how relays can be used to improve spectral efficiency in *interference* wireless networks. Specifically, we analyze fading interference relay networks where M single-antenna source-destination terminal pairs communicate concurrently and in the same frequency band through a set of K single-antenna relays using half-duplex two-hop relaying.

First, we consider a *coherent-relaying* protocol, where the relays have CSI and perform matched-filtering. The destination terminals cannot cooperate, i.e., the network operates in a completely distributed fashion. It is shown that in the large- M limit, provided K grows fast enough as a function of M , the network “decouples”. This means that the capacities of all individual source-destination pair links are

strictly positive. The signal power in all individual source-destination pair links dominates the interference power in these links. Therefore, all users in the network can transmit concurrently and in the same frequency-band. The required (for the network to decouple) rate of growth of K as a function of M is found to be sufficient to also make the individual source-destination fading links converge to nonfading links. We say that the network “*crystallizes*” as it breaks up into a set of effectively isolated “*wires in the air*”. A large-deviations analysis is performed to characterize the “crystallization” rate, i.e., the rate (as a function of M, K) at which the decoupled links converge to nonfading links.

Second, we consider the case of relays that do not have CSI and perform simple amplify-and-forward (AF) relaying. The destination terminals have CSI, and are allowed to cooperate and perform joint decoding. Based on tools from large random-matrix theory, we compute the per source-destination terminal pair capacity of this network for $M, K \rightarrow \infty$, with $K/M \rightarrow \beta$ fixed. We also find that for $\beta \rightarrow \infty$, the AF relay network is turned into a point-to-point multiple-input multiple-output (MIMO) link. This result demonstrates that employing relays as “active scatterers” can recover spatial multiplexing gain in poor scattering environments.

In Part II of the thesis, we consider exclusively systems with a single transmitter and a single receiver. We study the impact of absence of CSI at the receiver on channel capacity in two different models. This is summarized next.

The noncoherent capacity of stationary discrete-time fading channels is known to be very sensitive to the fine details of the channel model. More specifically, the measure of the set of harmonics where the power spectral density of the fading process is nonzero determines if capacity grows logarithmically in signal-to-noise ratio (SNR) or slower than logarithmically. An engineering-relevant problem is to characterize the SNR value at which this sensitivity starts to matter. To address this problem we start from the general model of continuous-time Rayleigh-fading channels that satisfy the wide-sense stationary uncorrelated scattering (WSSUS) assumption. In addition,

we assume that the channel is *underspread*, i.e., its scattering function is highly concentrated around the origin of the Doppler-delay plane. This is a highly relevant assumption for most real-life wireless channels and it simplifies our analysis significantly. We show that the noncoherent capacity of the WSSUS underspread channel is close to the additive white Gaussian noise channel capacity for all SNR values of practical interest, independently of whether the scattering function is compactly supported or not. As a byproduct of our analysis, we obtain an information-theoretic pulse-design criterion for pulse-shaped orthogonal frequency division multiplexing (PS-OFDM) systems.

Finally, we analyze the impact of multiple antennas at the receiver side of noncoherent channels using the temporally correlated Rayleigh block-fading single-input multiple-output (SIMO) channel model. Our analysis is aimed at characterizing the capacity pre-log, i.e., the asymptotic ratio between the capacity and the logarithm of SNR, as SNR goes to infinity. We derive a lower bound on the channel capacity pre-log and show that the capacity pre-log in the SIMO case is generally *larger* than that in the single-input single-output (SISO) case. The result is surprising, because in the *coherent* case the capacity pre-log of a SIMO fading channel is *the same as* that of a SISO fading channel.

Kurzfassung

Die Kanalkapazität entspricht der maximal erreichbaren Datenmenge, die pro Sekunde fehlerfrei über einen Kommunikationskanal gesendet werden kann. Die Kapazität eines drahtlosen Kanals zu bestimmen, ist aufgrund zweier Effekte ein schwieriges Problem: zum einen Interferenz, zum anderen Kanalschwund. Bei der Untersuchung von Schwundkanälen ist es üblich anzunehmen, dass der Empfänger den Kanalzustand vollkommen kennt, d. h., ein Orakel stellt dem Empfänger die Kanalzustandsinformation (CSI) zur Verfügung. In realen Systemen muss das CSI jedoch laufend erworben und erneuert werden. Um die Kosten für den Erwerb des CSI grundlegend zu bestimmen, muss man die Kapazität des Schwundkanals für den Fall, für den der Empfänger kein CSI besitzt, bestimmen; diesen Fall bezeichnet man auch als den nicht kohärenten Schwundkanal.

Der erste Teil dieser Dissertation ist der Frage gewidmet, wie Relais verwendet werden können, die spektrale Effizienz in drahtlosen Interferenznetzwerken zu erhöhen. Insbesondere werden Relais-Interferenzschwundnetzwerke untersucht, in denen M Einantennen Sender-Empfängerpaare gleichzeitig und im selben Frequenzband mittels einer Anzahl von K Einantennenrelais unter Verwendung eines halb-duplex Protokolls über zwei Zeitschlitze miteinander kommunizieren.

Zuerst untersuchen wir ein kohärentes Relaisprotokoll, bei welchem die Relais über CSI verfügen und daran angepasst filtern. Die Empfänger können nicht kooperieren, d.h., das Netzwerk funktioniert in einer vollständig dezentralisierten Art. Es wird gezeigt, dass sich das Netzwerk

für den Fall, in dem M groß wird, und K als Funktion von M ebenfalls groß genug ist, “aufteilen”. Das bedeutet, dass die Kapazitäten aller individuellen Sender-Empfängerpaarverbindungen strikt positiv sind. Die Signalleistung in allen individuellen Sender-Empfängerpaarverbindungen dominiert die Interferenzleistung in diesen Verbindungen. Deshalb können alle Nutzer in dem Netzwerk gleichzeitig im gleichen Frequenzband senden. Die notwendige Wachstumsrate von K (damit das Netzwerk sich aufteilen kann) als Funktion von M ist hinreichend, um auch die individuellen Sender-Empfängerschwindkanäle zu konstanten Verbindungen konvergieren zu lassen. Da das Netzwerk sich effektiv als “Drahtverbindung in der Luft” auffassen lässt, sagen wir fortan, dass sich das Netzwerk “kristallisiert”. Eine Analyse der großen Abweichungen wird durchgeführt, um die Kristallisationsrate zu charakterisieren, d.h., jene Rate (als Funktion von M und K), bei welcher die aufgeteilten Verbindungen zu konstanten Verbindungen konvergieren.

Danach betrachten wir den Fall, in dem die Relais über kein CSI verfügen und das Signal einfach verstärken und weiterleiten (AF). Die Empfänger verfügen über CSI und dürfen kooperieren und gemeinsam dekodieren. Basierend auf Erkenntnissen aus der Theorie der großen Zufallsmatrizen berechnen wir die Kapazität pro Sender-Empfängerpaar in diesem Netzwerk wenn $M, K \rightarrow \infty$, wobei $K/M \rightarrow \beta$ konstant bleibt. Wir zeigen auch, dass sich das AF Relaisnetzwerk für $\beta \rightarrow \infty$ in eine Punkt-zu-Punkt Mehrantennenverbindung mit mehreren Antennen auf Sender- und Empfängerseite wandelt. Dieses Resultat demonstriert, dass die Verwendung von Relais als “aktive Streuer” dazu führen kann, dass man den räumlichen Multiplexgewinn in schlechten Streuungsumgebungen erzeugen kann.

Im zweiten Teil dieser Dissertation betrachten wir ausschließlich Systeme mit einem einzigen Sender und einem einzigen Empfänger. Wir studieren die Auswirkung des Nichtvorhandenseins von CSI auf Empfängerseite auf die Kanalkapazität in zwei verschiedenen Modellen. Dies ist im Folgenden zusammengefasst.

Die nichtkohärente Kapazität von stationären zeitdiskreten Schwundkanälen ist bekanntermaßen stark abhängig von kleinen Details des

Kanalmodells. Genauer gesagt bestimmt das Mass der Menge der harmonischen Schwingungen bei welchen die spektrale Leistungsdichte des Schwundprozesses ungleich Null ist, ob die Kapazität logarithmisch im Verhältnis von Signal- zu Rauschenergie (SNR) oder langsamer als logarithmisch wächst. Ein aus Ingenieursicht relevantes Problem ist es, den SNR Wert, bei welchem die Signifikanz dieser Abhängigkeit gross ist, zu bestimmen. Um dieses Problem zu lösen, betrachten wir zuerst das allgemeine Modell zeitkontinuierlicher Rayleigh-Schwundkanäle, die die Annahme der weitestgehenden Stationarität und unkorrelierten Streuung (WSSUS) erfüllen. Zusätzlich nehmen wir an, dass der Kanal untergespreizt ist, d.h., seine Streufunktion ist stark um den Ursprung der Doppler-Verzögerungsebene konzentriert. Diese Annahme ist für die meisten realen Drahtloskanäle vollkommen angebracht und vereinfacht unsere Analyse signifikant. Wir zeigen, dass die nichtkohärente Kapazität des WSSUS unterspreizten Kanals für alle SNR Werte, welche von praktischem Interesse sind, nahe an der Kapazität des Kanals unter additivem Gausschen Rauschen ist. Dies gilt unabhängig von der Kompaktheit der Streufunktion. Als ein Nebenprodukt unserer Analyse erhalten wir ein informationstheoretisches Pulsdesignkriterium für Systeme, welche ein pulsförmiges orthogonales Frequenzmultiplexverfahren verwenden.

Zuletzt analysieren wir die Auswirkung, die mehrere Antennen auf der Empfängerseite auf nichtkohärente Kanäle haben, indem wir das zeitlich korrelierte Rayleigh-Blockschwundkanalmodell mit einem einzelnen Eingang und mehreren Ausgängen (SIMO) verwenden. Unsere Analyse zielt darauf ab, den Kapazitäts-"Pre-Log" zu bestimmen, d.h., das asymptotische Verhältnis zwischen der Kapazität und des Logarithmus des SNR, wenn das SNR groß wird. Wir leiten eine untere Schranke für den Kanalkapazitäts-Pre-Log her und zeigen, dass dieser im SIMO Fall im Allgemeinen größer ist als im Fall von einem einzelnen Eingang und einem einzelnen Ausgang (SISO). Dieses Resultat ist überraschend, da im kohärenten Fall der Kapazitäts-Pre-Log eines SIMO Schwundkanals genau gleich wie jener eines SISO Schwundkanals ist.