



Dissertation zum Thema

Centralized and Partial Decentralized Design for the Fog Radio Access Network

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Vorgelegt von: **M.Sc. Di Chen**
Vorsitzender:
Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Volker Kühn
Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Armin Dekorsy
Tag der Einreichung: 26.03.2021
Tag der Verteidigung:

Zusammenfassung

Das Cloud Radio Access Network (C-RAN) hat in jüngster Zeit weltweit eine explosive Begeisterung bei Forschern ausgelöst. Das Grundkonzept für das C-RAN ist einfach und unkompliziert: Verschiebe so viele Funktionen der Basisband-Signalverarbeitung wie möglich ins Cloud, um eine zentralisierte Verarbeitung und gemeinsame Optimierung zu erreichen. Im Uplink führen die dicht und weit verbreiteten RRHs (Remote Radio Heads), die an den Rändern des Netzwerks stehen, nur grundlegende Funkfrequenz Funktionen (RF) aus. Deshalb fungieren die RRHs nur als Signal-Kollektoren ohne komplizierte Signalverarbeitungsschritte. Die gesammelten Signale werden dann über die kapazitätsbegrenzten Fronthauls an den im Cloud befindlichen BBU (Base Band Unit) pool geliefert. Im BBU pool werden weitere Basisband-Signalverarbeitung zentral ausgeführt. Ähnlich ist der Downlink, wobei die meisten Basisband-Signalverarbeitungsschritte sowie einige Funktionen höherer Schichten im Cloud implementiert werden müssen, bevor die Datenströme an RRHs gesendet werden. Aufgrund einer solchen gemeinsamen und zentralisierten Verarbeitung im Cloud können wesentlich effizienteres Interferenz-Management, Ressourcenzuweisung, Verkehrsabwicklung usw. realisiert werden, was zu einer viel höheren Spektraleffizienz (SE) oder Energieeffizienz (EE) des Netzwerks führen kann. Daher wird gezeigt, dass C-RAN eine vielversprechende Netzwerk-Architektur für das drahtlose System der fünften Generation (5G) ist. Um einigen damit einhergehenden Nachteilen und praktischen Schwierigkeiten einer solchen zentralisierten Verarbeitung entgegenzuwirken, z. B. die hohe Latenz, die hohe Rechenkomplexität des BBU pools, die hohe Kapazitätsanforderung an die Fronthauls usw., wird das Fog Radio Access Network (F-RAN), das auf dem Fog Computing (Edge Computing) basiert, kürzlich vorgeschlagen. Im F-RAN entwickelt sich das RRH zum sogenannten enhanced RRH (eRRH). In der Praxis gibt es verschiedene Strategien zur Realisierung eines eRRH. Zum Beispiel, rüste ein RRH mit einigen eingeschränkten Rechenfähigkeiten aus, oder einfach füg einem eRRH ein Cache-Modul hinzu. Mit dem Fog-Computing können mehrere ausgewählte Basisband-Signalverarbeitungsfunktionen vom Cloud zum Netzwerkrand zurückgezogen werden. Diese Struktur ist in der Lage, mehrere Mängel von C-RAN zu überwinden, während viele Vorteile noch weiterhin bleiben können. Im Vergleich zu C-RAN ist natürlich ein gewisser Leistungsabfall unvermeidlich.

In dieser Arbeit untersuchen wir das Design und die Optimierung für F-RAN. Um vielfältige Anforderungen für verschiedene 5G-Szenarien zu erfüllen, berücksichtigen wir unterschiedliche Kriterien, z. B. ein auf hohe Energieeffizienz ausgerichtetes Design und ein auf hohe Spektraleffizienz (SE) ausgerichtetes Design. Für jedes Design werden sowohl Uplink als auch Downlink berücksichtigt. Darüber hinaus lösen wir dieses Problem in zwei Schritten: Im ersten Schritt schlagen wir den Rahmen für die gemeinsame Optimierung und das gemeinsame Design vor, bei dem alle Optimierungsaufgaben zentral im Cloud ausgeführt werden. Folglich sind die globalen Kanalstatusinformationen (Channel State Information, CSI) erforderlich, und eine große Menge an Overhead muss vom Netzwerkrand ins Cloud übertragen werden, was die tatsächliche Leistung des Netzwerks beeinträchtigen würde. Obwohl das zentralisierte Design theoretisch optimal ist, kann seine Rechenkomplexität in einigen Fällen unerschwinglich hoch sein, und der Overhead kann auch unerträglich sein. Daher fahren wir mit dem zweiten Schritt fort: Mit Hilfe des Edge-Computing sowie der Kanalhärtungseffekte (Channel hardening effect) aus dem Konzept von Massive MIMO, wird der Rahmen eines partiellen dezentralen Signalverarbeitungsmechanismus und dessen Optimierung vorgeschlagen. Bei diesem Ansatz ist nur eine teilweise CSI am BBU pool im Cloud erforderlich. Somit kann der Overhead stark reduziert werden. Darüber hinaus können, wie wir zeigen werden, auch der Rechenaufwand und sogar die Hardwarekosten reduziert werden.

Neben der Annahme eines perfekten CSI untersuchen wir auch das robuste Design und die Optimierung des Netzwerks basierend auf ungenauen CSI. Im Vergleich zur herkömmlichen Netzwerkarchitektur kann die Unvollkommenheit von CSI in C-RAN oder F-RAN ein schwerwiegenderes Problem sein. Da die CSI am Netzwerkrand gesammelt und dann ins Cloud geliefert werden, kann dies zu weiteren Verzerrungen führen. Daher lohnt es sich auch zu untersuchen, wie die garantierte Dienstgüte (QoS) für verschiedene Kriterien, jedoch nur mit ungenauen CSI-Kenntnissen, sichergestellt werden kann.

Basierend auf der Forschung und den entsprechenden numerischen Ergebnissen dieser Arbeit können einige interessante Eigenschaften von C-RAN und F-RAN gezeichnet werden, die einige Richtlinien für ihren praktischen Einsatz in naher Zukunft liefern könnten.

Abstract

Cloud Radio Access Network (C-RAN) has attracted an explosive enthusiasm among researchers worldwide in recent years. The basic concept for the C-RAN is rather simple and straightforward: Moving as much base band signal processing functionalities as possible to the cloud, in order to achieve a centralized processing and joint optimization. In the uplink, the densely and widely distributed Remote Radio Heads (RRHs) positioning on edges of the network perform only rather basic Radio Frequency (RF) functions, which act only as signal collectors without any complicated signal processing steps. The collected signals are then delivered, via the capacity-limited fronthauls, to the Base Band Unit (BBU) pool located in the cloud. At the BBU pool, further based band signal processing procedures are executed jointly in a centralized manner. The downlink is similar, where most base band signal processing steps, as well as some higher layer functionalities, have to be implemented in the cloud, before sending the data streams to RRHs. Due to such joint and centralized processing in the cloud, much more efficient interference management, resource allocation, traffic handling, etc., can be realized, which can lead to much higher Spectral Efficiency (SE) and Energy Efficiency (EE) of the network. Hence, C-RAN is shown to be a promising network architecture for the Fifth Generation (5G) wireless system. In order to combat against some accompanied emerging drawbacks and practical difficulties of such centralized processing, e.g, high latency, high computational complexity of the BBU pool, high capacity demand on the fronthauls, etc., the Fog Radio Access Network (F-RAN), based on the fog computing (edge computing), has been proposed and widely discussed recently. In F-RAN, the RRH evolves in to the so-called enhanced RRH (eRRH). There are various strategies in the realization of an eRRH in practice. For example, equipping a RRH with some limited computational capabilities, or simply adding a cache module to it. With the fog computing, several selected base band signal processing functionalities can be pulled back from the cloud to the network edge. With such a structure, some shortcomings of C-RAN can be overcome, while many benefits can still be retained. Naturally, compared to C-RAN, some performance degradation is inevitable.

In this work, we investigate the design and optimization for F-RAN. In order to fulfill different requirements for various 5G scenarios, we take different criteria into

consideration, e.g., high Energy Efficiency (EE) oriented design, and high Spectral Efficiency (SE) oriented design. For each architecture, both uplink and downlink are considered. Furthermore, we tackle this problem in two steps: In the first step, we propose the framework of joint optimization and design, where all optimization tasks are performed in a centralized manner at the cloud, the global Channel State Information (CSI) is thus required. Therefore, a large amount of overhead has to be conveyed from the network edge to the cloud, which would impair the actual performance of the network. Although the centralized design is theoretical optimal, its computational complexity might be prohibitively high in some cases, and the amount of overhead can also be intolerable. Therefore, we proceed to the second step: With the help of the edge computing, as well as the channel hardening effects from the concept of Massive MIMO, the framework of a partial decentralized signal processing mechanism and optimization are proposed. In this approach, only partial CSI is required at the BBU pool in the cloud. Thus, the amount of overhead can be greatly reduced. Moreover, as we are going to show, the computational complexity, and even the hardware costs can also be reduced.

Besides the assumption of perfect CSI, we also investigate the robust design and optimization of the network based on inaccurate CSI. Compared to the conventional network architecture, the imperfection of CSI in C-RAN or F-RAN might be a more severe issue. Since the CSI are collected at the network edge and delivered to the cloud, which might result in more distortions. Therefore, how to ensure the guaranteed Quality of Service (QoS) for different criteria, but with only inaccurate CSI knowledge, is also worth to be investigated.

Based on the research and the corresponding numerical results of this thesis, some interesting properties of C-RAN and F-RAN can be drawn, which yields some guidelines to their practical deployment in the near future.