

Hardware-Beschleuniger für den Protokoll-Stack mobiler LTE-Empfänger: Entwurf und Analyse von Schaltungsarchitekturen

Dipl.-Ing. Sebastian Hessel, Lehrstuhl für Integrierte Systeme, Ruhr-Universität Bochum

Zukünftige Mobilfunksysteme wie die 3G Long Term Evolution (LTE) zeichnen sich durch höhere Datenraten bei gleichzeitig reduzierten Latenzzeiten aus. Damit steigt auch der Verarbeitungsaufwand in den Protokollschichten, der durch eine höhere Leistungsfähigkeit der ausführenden Hardware kompensiert werden muss. Eine gängige Lösung hierzu ist die Verwendung dedizierter Hardware zur Beschleunigung ausgewählter Funktionen der Datenverarbeitung. Zurückblickend auf die Evolution mobiler Empfänger haben sich diese Hardware-Beschleuniger hauptsächlich im digitalen Basisband etabliert. Da die Rechenkomplexität in den höheren Protokollschichten jedoch ebenfalls mit den steigenden Datenraten skaliert, sind zukünftig auch hier wohlgedachte Lösungen zur Hardware-Beschleunigung erforderlich. Ihr Einsatz muss dabei nicht zwangsläufig durch eine fehlende Rechenleistung der verfügbaren Mikroprozessoren motiviert sein, sondern kann auch auf eine Optimierung des Energiebedarfs im Gesamtsystem abzielen.

Diese Arbeit befasst sich mit dem Entwurf und der Analyse von dedizierten Hardware-Komponenten zur Unterstützung der Downlink-Datenverarbeitung im Protokoll-Stack eines mobilen LTE-Empfängers. Mithilfe hardwarenaher Beschreibungen auf Register-Transfer-Ebene werden diese hinsichtlich ihrer Hardware-Charakteristika untersucht und optimiert. Das Ziel ist dabei die Erforschung von Schaltungsarchitekturen, die den zeitlichen Anforderungen bezüglich des maximalen Datendurchsatzes genügen und gleichzeitig die Verlustleistung sowie den Flächenbedarf möglichst gering halten.

Die Grundlage dieser Arbeit bildet das neuartige Konzept des smart Direct Memory Access (sDMA) Controllers. Dieser Hardware-Beschleuniger erweitert einen konventionellen DMA-Controller um weitere Verarbeitungsblöcke, in denen die Funktionen zur Datenentschlüsselung sowie zur Header-Decodierung der zweiten Protokollschicht integriert sind. Im Vergleich zu einem konventionellen Hardware-Beschleuniger mit separatem DMA-Controller kann durch dieses Prinzip die Anzahl der benötigten Buszugriffe halbiert und damit die Leistungsfähigkeit einer Mobilfunkplattform drastisch gesteigert werden. Die Untersuchungen zu den Hardware-Charakteristika in dieser Arbeit verdeutlichen zudem, dass der sDMA-Controller auch hier deutliche Verbesserungen aufweist: Gegenüber der konventionellen Lösung wird der Flächenbedarf um circa 13 %, der Energieverbrauch sogar um fast zwei Drittel gesenkt.

Darüber hinaus wird das sDMA-Konzept mithilfe der hardwarenahen Modelle weiter optimiert. In der Komponente zur Header-Verarbeitung führt eine Änderung der Hardware/Software-Partitionierung in Richtung Software zu einer Reduzierung der Chipfläche des sDMA-Controllers um circa 33 %, während gleichzeitig die Hälfte der Verlustleistung eingespart werden kann. Es zeigt sich zudem, dass der damit verbundene Rückgang der Leistungsfähigkeit der gesamten Mobilfunkplattform marginal und somit im Vergleich zu den enormen Hardware-Einsparungen vernachlässigbar ist.

Des Weiteren erfolgt eine umfassende Analyse zur Implementierung der Datenentschlüsselungseinheit, die die für LTE spezifizierten Chiffren SNOW 3G und Advanced Encryption Standard (AES) realisiert. Diese stellt für die jeweils verwendeten S-Boxen das Prinzip der One-Hot-Codierung als optimale Lösung hinsichtlich der Hardware-Charakteristika heraus. Darüber hinaus verdeutlicht eine Untersuchung der eingesetzten Datenpfadbite im AES, dass je nach Datenrate entweder die 32-Bit-Architektur (unterhalb von 100 Mbit/s) oder die 128-Bit-Architektur (oberhalb von 100 Mbit/s) eine geeignete Wahl darstellt. Unabhängig davon liegt der erreichbare Datendurchsatz bei typischen Paketgrößen jedoch grundsätzlich hinter dem des SNOW 3G zurück. Dieses Verhältnis lässt sich durch eine AES-Architektur mit mehreren parallelen Verarbeitungsinstanzen umkehren, wodurch abermals erhöhte Datenraten, z.B. für LTE-Advanced, bewältigt werden können.