

Diss. ETH No. 15939

Recursive Demodulation Schemes for the WCDMA Downlink in the UMTS Terrestrial Radio Access

A dissertation submitted to the
SWISS FEDERAL INSTITUTE OF TECHNOLOGY ZURICH
for the degree of
DOCTOR OF TECHNICAL SCIENCES

presented by
MAURO PESCE
Dipl. El.-Ing. ETH Zürich
born March 14, 1968
citizen of Italy

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. Dirk H. Dahlhaus, examiner
Prof. Dr. Josef A. Nossek, co-examiner

2005

Abstract

This thesis addresses the design of different recursive and non-recursive demodulation schemes for the wideband code-division multiple access (WCDMA) downlink in the Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) terrestrial radio access (UTRA).

We consider a simplified—with respect to the UTRA specifications—WCDMA downlink system, where there are K simultaneously active users to be served in the specific cell and both base station and mobile-terminal-of-interest (MOI) are each equipped with one antenna. The received signal at the MOI is the sum of an information bearing signal and an additive thermal noise and is described by a time-discrete model. The information bearing signal results from the sum of a common pilot channel (CPICH) and K user signals at the output of a time-varying multipath channel.

Applying specific approximations for the coefficients of the channel impulse response (CIR) and the downlink signals, we derive different state-space models for the received signal, where the models serve as a basis for the development of recursive schemes performing channel estimation, equalization for given CIRs, or joint channel estimation and equalization. While Kalman filters are adopted in the first two cases, their use is ruled out in the last case due to nonlinearities in the observation equations of the corresponding state-space representations. Hence, we derive recursive schemes that employ first- or second-order expansions of these nonlinearities and, furthermore, can cope with the effects of nonminimum-phase channels, as encountered in typical mobile communications environments.

In a further step, the developed recursive equalization schemes are extended in order to incorporate a CPICH-based constraint that exploits the orthogonality among the transmit signals. In most cases, the constrained versions of the recursive equalizers lead to performance improvements with respect to the corresponding unconstrained schemes. The CPICH-based constraint as well as additional constraints involving the combined spreading and scrambling code of the MOI are also incorporated into non-recursive block-equalizers applying the least-squares (LS) or minimum mean-square error (MMSE) criteria which turn out to be

rather robust with respect to nonminimum-phase channel characteristics.

In order to improve the quality of the channel estimates being used by the non-recursive block-equalizers, novel concepts for adaptive block-equalization using modified LS and MMSE methods are presented. The gradient-based adaptation, relying on a cost function involving the CPICH, is carried out directly with respect to the CIR coefficients required to compute the block-equalizer matrices. Therefore, in contrast to classical adaptive filter techniques, the number of coefficients to be adapted corresponds to the number of propagation paths and is thus independent of the chosen block size. The adaptive non-recursive block-equalizers yield remarkable performance improvements with respect to the corresponding non-adaptive schemes. Still, the best bit-error rate performance is obtained using recursive receiver schemes.

Kurzfassung

Gegenstand der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung verschiedener rekursiver und nicht-rekursiver Demodulationsverfahren für die auf breitbandigem Codevielfachzugriff (wideband code-division multiple access, WCDMA) basierende Abwärtsstrecke im Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) Terrestrial Radio Access (UTRA), der terrestrischen Luftschnittstelle von UMTS.

Es wird eine gegenüber den UTRA-Spezifikationen vereinfachte WCDMA-Abwärtsstrecke angenommen, in der sowohl die Basisstation, welche in der betrachteten Zelle K gleichzeitig aktive Benutzer zu bedienen hat, als auch das Endgerät des gewünschten Benutzers (mobile-terminal-of-interest, MOI) mit jeweils einer Antenne bestückt sind. Das Empfangssignal am MOI besteht aus der Summe eines Informationssignals und eines additiven thermischen Rauschens und wird im Rahmen eines zeitdiskreten Modells beschrieben. Dabei ergibt sich das Informationssignal aus der Summe eines gemeinsamen Pilotsignals (common pilot channel, CPICH) und K Benutzersignalen am Ausgang eines zeitvarianten Mehrwegkanals.

Ausgehend von spezifischen Approximationen für die Koeffizienten der Kanalimpulsantwort sowie die Signale in der Abwärtsstrecke, ergeben sich verschiedene Zustandsraummodelle des Empfangssignals, welche als Grundlage für die Entwicklung von rekursiven Verfahren zur Kanalkoeffizientenschätzung, zur Entzerrung für gegebene Kanalimpulsantworten sowie zur gemeinsamen Kanalkoeffizientenschätzung und Entzerrung dienen. In den ersten beiden Fällen kommen Kalman-Filter zum Einsatz, während dies im letzten Fall aufgrund der Nichtlinearitäten in den Beobachtungsgleichungen der entsprechenden Zustandsraumdarstellungen ausgeschlossen ist. Es werden hingegen rekursive Verfahren vorgeschlagen, in denen die Nichtlinearitäten durch Reihenentwicklungen erster oder zweiter Ordnung ersetzt werden und die zudem gegenüber nicht-minimalphasigen Kanälen, wie sie oft in Mobilfunkumgebungen anzutreffen sind, robust sind.

In einem weiteren Schritt werden die rekursiven Entzerrer um eine

CPICH-basierte Randbedingung erweitert, welche die Orthogonalität der Sendesignale ausnutzt. In den meisten Fällen führen die mit der Randbedingung erweiterten Entzerrer zu besseren Resultaten als die entsprechenden nicht erweiterten Filter. Dieselbe CPICH-basierte Randbedingung sowie weitere, auf der kombinierten Spreiz- und Verwürfelungssequenz des MOI beruhende Randbedingungen werden auch in nicht-rekursiven blockbasierten Entzerrern eingebaut, welche auf den Methoden der kleinsten Quadrate (least-squares, LS) oder des minimalen mittleren Fehlerquadrats (minimum mean-square error, MMSE) basieren. Diese Ansätze stellen sich als relativ unempfindlich gegenüber nicht-minimalphasigen Kanälen heraus.

Um die Qualität der von den nicht-rekursiven Block-Entzerrern verwendeten geschätzten Kanalimpulsantworten zu verbessern, werden neuartige Konzepte für adaptive Block-Entzerrer vorgestellt, welche auf modifizierten LS- und MMSE-Kriterien basieren. Die Adaption mittels Gradientenverfahren beruht auf einer CPICH-basierten Kostenfunktion und bezieht sich direkt auf die Kanalparameter, welche zur Berechnung der jeweiligen Entzerrermatrizen herangezogen werden müssen. Dadurch entspricht die Anzahl zu adaptierender Koeffizienten der Anzahl Ausbreitungspfade und ist somit unabhängig von der gewählten Blockgröße. Gegenüber den entsprechenden nicht-adaptiven, nicht-rekursiven Block-Entzerrern erzielen die adaptiven Verfahren deutlich bessere Ergebnisse hinsichtlich der resultierenden Bitfehlerraten, werden aber in ihrer Übertragungsgüte von den rekursiven Strukturen noch übertroffen.