

Diss. ETH No. 21004

Contributions Towards Optimized Antennas for On-Body Operation

A dissertation submitted to the
ETH ZURICH

for the degree of
Doctor of Sciences

presented by
CHUNG-HUAN LI

MSc National Taiwan University of Science and Technology
born 20 05 1979
citizen of Taiwan

accepted on the recommendation of
Prof. Dr. G. Szekely, examiner
Prof. Dr. N. Kuster, co-examiner
Prof. T. Samaras, co-examiner

2013

Summary

The number of mobile phone subscribers, as reported by the International Telecommunication Union, surpassed the six billion milestone in October 2012; each of these phones includes various transmitters operating at different frequencies. Mobile transmitters became pervasive throughout the world within three decades of the first deployments in Tokyo in 1979, which was followed by the introduction of the Nordic Mobile Telephone (NMT) system in northern European countries in 1981. Within the next few months, 4th generation (4G) handsets will be fully deployed. During the last decade, wireless data networks in offices, homes, and public spaces (airports, trains, hotels, etc.) have also become widespread. This explosion in the usage of handheld transmitters has generated the need for research on small efficient antennas and associated exposure risk assessments.

The coupling mechanisms of transmitters in close proximity to the body (head and trunk), including dependence on head and body shape (external anatomy), complex tissue distribution (internal anatomy), age, ears, implants, antenna factors, etc., have been studied in detail during the last ten years. A large portion of the research related to these issues was conducted by PhD students at the ETH and IT'IS Foundation during the 1990s and early 2000s. This research resulted in new guidelines for antenna development, product standards, and was fundamental to progress in risk assessment related to the radiofrequency (RF) exposure associated with mobile phone use.

In this thesis, some of the main remaining unresolved issues, namely, the effect of the hand on antenna performance and RF exposure of the hand and head, is addressed. In the first study of Part I (Chapter 4), the effect of the hand on over-the-air (OTA) performance of the transmitter is investigated. The objectives were to provide input for standardization and tools

for optimization of handheld transmitters. The results of the study reveal that testing the OTA performance without the hand (standard practice at the time of the study) correlates only poorly to real-life performance. The significance of hand parameters with respect to OTA performance impairments were, in order of importance: 1) the position of the index finger; 2) the distance between the phone case and palm; 3) the position of the remaining fingers; 4) the size of the hand; 5) dielectric parameters; and 6) wrist length and tilt. An unexpected finding of the study is that the presence of the hand may increase the exposure of the head in some cases. This, together with further evidence from experimental studies conducted by industry, laid the groundwork for the second study.

In the second study of Part I (Chapter 5), the influence of the user's hand holding a mobile phone to the ear on the peak spatial specific absorption rate (psSAR) averaged for 1g and 10g samples of head tissue was investigated both experimentally and computationally, and the results compared to current measurement standards, i.e., the measurement of SAR in a head phantom without a hand present. The mechanisms of interaction between the hand and mobile phone models were studied. In addition, simulations and measurements at 900 and 1800 MHz were conducted to elucidate the hand grip parameters that lead to higher SAR in the head. Numerical simulations were conducted on four mobile phone models, and parameters such as the palm-phone distance and hand position were varied. Measurements were made on 46 commercial mobile phones, and the maximum psSAR at different hand positions and palm-phone distances was recorded. Both simulations and measurements demonstrate that the increase in the psSAR inside the head caused by the presence of the hand may exceed 2.5 dB. Furthermore, the psSAR is sensitive to hand grip, i.e., the variations can exceed 3 dB.

The last study of Part I (Chapter 6) describes remaining questions regarding the exposure of the hand, i.e., the fingers and palm. First, the mechanisms of absorption in the hand of electromagnetic (EM) fields in the 900 to 3700 MHz frequency range was analyzed, and the envelope of the psSAR of the hand with respect to the psSAR limits calculated. Further investigations included whether a standardized test method based on a flat phantom is conservative. The results demonstrate that the absorption of RF energy in the hand is larger than that predicted by testing with a flat phantom; enhancements of several dB are observed, depending on the model parameters. The results are used to generate correction factors for conservative estimation of

SAR in the hand measured with flat phantoms.

These studies have been published in peer-reviewed journals and presented to standards groups and government agencies. Over-the-air (OTA) evaluations are currently conducted with hand phantoms included. The groups that develop product standards for demonstration of compliance with safety limits are currently working to integrate this knowledge into the next revision of the standards.

While Part I addresses the issue of how to optimize antennas that minimally couple with the human body with maximized omni-directional radiation, Part II focuses on the counter task of developing antenna configurations that couple effectively to specific tissue regions (tumors) while minimizing exposure of healthy tissues and radiation into the environment. Hyperthermia (HT) was considered a promising treatment modality already during the 1970s and 1980s, until two large clinical trials showed that HT correlates only poorly with recovery rates of cancer patients. Today, it is believed that the lack of proper applicators and reliable treatment tools were largely responsible for the failure of HT in the clinical trials. The complexity and difficulty involved in designing HT applicators, especially for non-invasive application (external delivery of EM power), was underestimated.

Part II begins with a brief background and the biological rationale of HT treatment, and a literature review of the EM technology used and proposed for noninvasive HT applications, including low-frequency methods, phased arrays at RF frequencies, and some alternative approaches. The final study (Chapter 10) describes the design of a novel HT applicator, based on a phased array of cavity-backed slot antennas, developed for treatment of tumors in the head-and-neck region. The design of the antenna array as well as optimization of patient positioning based on the location of the tumor is covered, as we have found that the position of the body, which had been overlooked in previous studies, is critical for optimized exposure. A real patient model was tested with this applicator and the optimized position, and the results show that more than 90% of the tumor volume can be irradiated with sufficient EM exposure, without the development of non-target hotspots. The applicator design has significant advantages over the current prototypes currently being tested in clinical trials.

These findings form the basis of a treatment approach currently in use at the ERASMUS MC Oncology Center in Rotterdam and also serve as input towards development of next generation applicators to be employed at the University of Zurich in 2014.

Zusammenfassung

Die Zahl der Nutzer von Mobiltelefonen, die von der Internationalen Fernmeldeunion (ITU) angegeben wird, überschritt im Oktober 2012 die Marke von sechs Milliarden. Jedes dieser Mobiltelefone enthält unterschiedliche Sender, die auf verschiedenen Frequenzen arbeiten. Nach ihrem ersten Einsatz in Tokio im Jahre 1979, dem 1981 die Einführung des Nordic Mobile Telephone (NMT) Systems in den Ländern Nordeuropas folgte, durchdrangen tragbare Sender innerhalb dreier Jahrzehnte die ganze Welt. In den kommenden Monaten werden Mobilgeräte der vierten Generation (4G) vollständig eingeführt. Während des vergangenen Jahrzehnts wurden drahtlose Datennetze am Arbeitsplatz, zu Hause und an öffentlichen Plätzen (an Flughäfen, in Zügen, in Hotels usw.) ebenfalls allgegenwärtig. Durch diese Explosion bei der Nutzung tragbarer Sender entstand neuer Forschungsbedarf auf den Gebieten der Entwicklung kleiner und effizienter Antennen und der Bewertung der Risiken durch die mit ihrer Verwendung einhergehende Belastung.

Die Kopplungsmechanismen von Sendern in unmittelbarer Nähe des Körpers (Kopf und Rumpf) einschliesslich der Abhängigkeit von der Form des Kopfes und des Körpers (externe Anatomie), von der komplexen Verteilung der Körpergewebe (interne Anatomie), vom Alter, von den Ohren, von Implantaten, von den Eigenschaften der Antenne usw. wurden in den vergangenen zehn Jahren im Detail untersucht. Ein Grossteil der Forschung auf diesen Gebieten wurde von Doktoranden der ETH und der IT'IS Foundation in den 1990er und 2000er Jahren durchgeführt. Die Forschungsarbeiten führten zu neuen Richtlinien für die Antennenentwicklung und für Produktnormen, und sie waren entscheidend für Fortschritte bei der Abschätzung der Risiken durch Belastung durch Hochfrequenz (HF) beim Gebrauch von Mobiltelefonen.

Diese Arbeit befasst sich mit einigen der wesentlichen unbeantwortet gebliebenen Fragen, nämlich mit dem Einfluss der Hand auf die Betriebseigenschaften der Antenne und auf die Belastung des Kopfes und der Hand selbst. In der ersten Studie des ersten Teils (Kapitel 4) wird der Einfluss der Hand auf die Freiraumübertragungseigenschaften (over-the-air performance) des Senders untersucht. Zielsetzung war es, zur Standardisierung und zu Werkzeugen für die Optimierung tragbarer Sender beizutragen. Die Ergebnisse der Studie zeigten, dass die Messung der Freiraumübertragungseigenschaften ohne die Hand (gängige Praxis zur Zeit der Studie) nur mangelhaften Aufschluss über die Leistungsfähigkeit in realen Situationen gibt. Die Bedeutung der Parameter der Hand im Bezug auf die festgestellte Beeinträchtigung der Freiraumübertragungseigenschaften sind (nach Stellenwert geordnet): 1) die Position des Zeigefingers, 2) der Abstand zwischen dem Gehäuse des Telefons und der Handfläche, 3) die Position der übrigen Finger, 4) die Grösse der Hand, 5) die dielektrischen Eigenschaften und 6) die Länge und Neigung des Handgelenks. Ein unerwartetes Ergebnis der Studie war, dass die Gegenwart der Hand in manchen Fällen zu einem Anstieg der Belastung des Kopfes führt. Dies - zusammen mit weiteren Anhaltspunkten aus Messungen, die von der Industrie durchgeführt worden waren - legte die Grundlagen für die zweite Studie.

In der zweiten Studie des Teiles I (Kapitel 5) untersuchte ich sowohl messtechnisch als auch mittels numerischer Simulationen den Einfluss der Hand des Benutzers eines am Ohr gehaltenen Mobiltelefons auf die über 1 g und 10 g Kopfgewebe gemittelte Peak-Spatial-Average-SAR und verglich die Ergebnisse mit den geläufigen Messnormen, die die Bestimmung der SAR in einem Kopfphantom ohne Verwendung einer Hand definieren. Die Mechanismen der Beeinflussung zwischen Hand und Mobiltelefonmodellen werden untersucht, und zusätzlich werden Simulationen und Messungen bei 900 MHz und 1800 MHz durchgeführt, um diejenigen Parameter des Griffs zu erklären, die zu höherer SAR im Kopf führen. Vier Modelle von Mobiltelefonen wurden simuliert, und Parameter wie z. B. der Abstand zwischen Handfläche und Telefon und die Position der Hand wurden variiert. 46 handelsübliche Mobiltelefone wurden gemessen und ihre maximale Peak-Spatial-Average-SAR bei unterschiedlichen Handpositionen und Abständen zwischen Handfläche und Telefon aufgezeichnet. Sowohl die Simulationen als auch die Messungen zeigen, dass der Anstieg der Peak-Spatial-Average-SAR im Kopf, der durch die Hand verursacht wird, 2,5 dB überschreiten kann. Zudem reagiert die Peak-Spatial-Average-SAR empfindlich auf die

Eigenschaften des Griffs, d. h., die Unterschiede können 3 dB überschreiten.

Die letzte Studie des Teiles I (Kapitel 6) beschreibt verbleibende Fragen im Hinblick auf die Belastung der Hand, d. h. der Finger und der Handfläche. Zuerst wurde der Absorptionsmechanismus elektromagnetischer (EM) Felder in der Hand im Frequenzbereich von 900 MHz bis 3700 MHz analysiert, und eine Hüllkurve für die Peak-Spatial-Average-SAR im Bezug auf die Grenzwerte wird berechnet. Weiterhin untersuchten wir, ob ein standardisiertes Testverfahren mit einem Flachphantom ein konservatives Ergebnis liefert. Die Ergebnisse zeigen, dass die Absorption der HF-Energie in der Hand grösser ist als die durch das Flachphantom bestimmten Werte. In Abhängigkeit von den Modellparametern wurden Erhöhungen von einigen dB beobachtet. Mit diesen Ergebnissen wurden Korrekturfaktoren bestimmt, mit denen sich die SAR in der Hand durch Messung an einem Flachphantom konservativ bestimmen lässt.

Diese Studien wurden in referierten Fachzeitschriften veröffentlicht und Normierungsausschüssen und Regierungsbehörden vorgestellt. Bei der Ermittlung der Freiraumübertragungseigenschaften (over-the-air performance) werden derzeit Handphantome verwendet. Die Ausschüsse, die Produktnormen zur Überprüfung der Grenzwerte entwickeln, bereiten die Einbindung der Erkenntnisse dieser Arbeit in die nächsten Revisionen der Normen vor.

Während sich Teil I mit der Frage nach der Optimierung von Antennen befasst, die möglichst wenig Energie in den menschlichen Körper einkoppeln und gleichzeitig über bestmögliche Rundstrahleigenschaften verfügen, konzentriert sich Teil II auf die entgegengesetzten Fragestellung, nämlich auf die Entwicklung von Antennenkonfigurationen, die effektiv in bestimmte Geweberegionen (Tumore) einkoppeln, wobei die Belastung des gesunden Gewebes und die Abstrahlung in die Umgebung minimiert werden sollen. Die Hyperthermie (HT) wurde bereits in den siebziger und achtziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts als vielversprechendes Behandlungsverfahren betrachtet, bis zwei klinische Grossstudien zeigten, dass HT-Behandlung nur in mangelhaftem Zusammenhang mit den Genesungsraten von Krebspatienten steht. Heute glaubt man, dass der Mangel an geeigneten HT-Applikatoren und zuverlässigen Behandlungswerkzeugen allgemein für das Scheitern der HT in den klinischen Studien verantwortlich zu machen ist. Die Komplexität und die Schwierigkeiten bei der Entwicklung von HT-Applikatoren wurden insbesondere bei nichtinvasiver Anwendung (Applikation der HF-Leistung von aussen) unterschätzt.

Teil II beginnt mit einer kurzen Zusammenfassung der Grundlagen und des biologischen Prinzips der HT-Behandlung sowie mit einer Literaturübersicht zu bereits verwendeten und neu vorgeschlagenen EM-Technologien für nicht-invasive HT-Anwendungen. Diese schliesst auch Niederfrequenzmethoden, Phased-Array-Antennen (HF) und einige alternative Ansätze mit ein. Die abschliessende Studie (Kapitel 10) beschreibt den Entwurf eines neuartigen HT-Applikators, der auf einem Phased-Array aus Schlitzantennen basiert und für die Behandlung von Tumoren im Kopf- und Halsbereich entwickelt wurde. Der Entwurf des Antennenarrays und die Optimierung der Lage des Patienten an Hand der Position des Tumors wird beschrieben, da ein Ergebnis der Studie war, dass die Lage des Körpers für die optimierte Anwendung entscheidend ist - ein Ergebnis, das in vorangegangenen Studien übersehen wurde. Das Modell eines realen Patienten wird mit diesem Applikator in optimierter Lage getestet, und die Ergebnisse zeigen, dass mehr als 90 % des Tumors mit ausreichender Belastung durch elektromagnetische Felder bestrahlt werden kann, ohne dass es zu Hotspots ausserhalb der Zielregion kommt. Dieser Applikator hat massgebliche Vorteile gegenüber anderen aktuellen Prototypen, die derzeit in klinischen Tests untersucht werden.

Diese Ergebnisse bilden die Basis eines Behandlungsansatzes, der zur Zeit beim ERASMUS MC Zentrum für Onkologie in Rotterdam verwendet wird. Darüberhinaus dienen sie als Beitrag zur Entwicklung der Folgegeneration von Applikatoren, die im Jahre 2014 an der Universität Zürich verwendet werden wird.