

Vlakke antennesystemen
voor toepassingen binnen het 'Internet der Dingen'

Low-Profile Antenna Systems
for the Next-Generation Internet of Things Applications

Sam Lemey

Promotoren: prof. dr. ir. H. Rogier, prof. dr. ir. J. Vanfleteren
Proefschrift ingediend tot het behalen van de graad van
Doctor in de ingenieurswetenschappen: elektrotechniek

Vakgroep Informatietechnologie
Voorzitter: prof. dr. ir. D. De Zutter

Vakgroep Elektronica en Informatiesystemen
Voorzitter: prof. dr. ir. R. Van de Walle

Faculteit Ingenieurswetenschappen en Architectuur
Academiejaar 2015 - 2016



Samenvatting

In de nabije toekomst zal het 'Internet der Dingen' (Engels: 'Internet of Things', 'IoT') de manier waarop we leven en werken compleet veranderen. Gestimuleerd door de ontwikkeling van verschillende baanbrekende technologieën worden binnen deze visie alledaagse objecten, machines en zelfs kledij voorzien van extra functionaliteit, zoals waarnemen via sensoren, dataverwerking, lokalisatie en draadloze communicatie. Dit laat hen toe om hun omgeving en de context te begrijpen en gepast te reageren. Door vervolgens deze intelligente objecten te verbinden met het internet, zal er een constante stroom data en kennis aangeleverd worden die ons helpt betere beslissingen te nemen in alle aspecten van ons leven. Het zal zorgen voor meer bewustzijn over onze omgeving en onze eigen fysieke toestand. Meer nog, het zal ons in staat stellen om onze omgeving te controleren en te beïnvloeden op manieren die we ons nu nog niet volledig kunnen voorstellen.

Intelligente oppervlakte technologie (Engels: 'Smart Surface Technology'), en meer bepaald intelligente textielsystemen, spelen een belangrijke rol bij de ontwikkeling van het 'Internet der Dingen'. Binnen deze tak van draagbare systemen wordt de functionaliteit van alledaagse kledij uitgebreid door sensoren, elektronica en draadloze communicatiesystemen rechtstreeks in het textiel zelf te implementeren met als doel de fysieke toestand van de gebruiker en zijn interactie met de omgeving nauwgezet op te volgen. Het is duidelijk dat deze technologie interessante nieuwe opportuniteiten opent om de mogelijkheden van de gebruiker beduidend te verhogen in een breed scala aan toepassingsgebieden, en dit zonder hem/haar te overladen met extra apparatuur. Het uitrusten van reddingswerkers met dergelijke intelligente kledij laat toe om hun vitale parameters en locatie op te volgen vanuit een centrale commandopost en in te grijpen indien nodig. Het uitrollen van zulke systemen tijdens interventies draagt bij tot het beter en veiliger uitvoeren van hun hoofdtaak, namelijk het redden van levens. In de gezondheidszorg kunnen intelligente textielsystemen een drastische verbetering betekenen voor de levenskwaliteit van zowel patiënten als ouderen, door thuiszorg en zelfstandig leven te ondersteunen. Dit helpt tevens om de kost voor de samenleving in te perken. Verder werden recent ook andere, nieuwe concepten ontwikkeld die gebruik maken van intelligente oppervlakte technologie om de interactie met de omringende infrastructuur zo onopvallend mogelijk te maken, zoals intelligente vloeren, intelligent behangpapier en intelligente plafonds.

In dit proefschrift concentreren we ons op twee fundamentele technologische uitdagingen die gerelateerd zijn met het ontwerp van antennesystemen voor toepassing binnen het IoT concept. Het eerste deel van dit werk is voornamelijk gewijd aan het ontwerp van robuuste antennesystemen die een onzichtbare integratie toelaten in een intelligente vloer, plafond of bureau. Hierbij wordt extra aandacht

besteed om een betrouwbare en snelle draadloze communicatielink op te zetten over een zeer kleine afstand binnen een beperkte, afgebakende ruimte.

In Hoofdstuk 2 gaan we de uitdaging aan met de strenge ontwerpvereisten die verbonden zijn aan de realisatie van onzichtbaar geïntegreerde antennesystemen die geschikt zijn om de datasnelheden te ondersteunen die gepaard gaan met de volgende generatie multimediatoepassingen. Hiervoor combineren we de substraatgeïntegreerde golfgeleiderimplementatietechnologie (Engels: 'Substrate Integrated Waveguide technology' of 'SIW technology') met de welgekende sleuf-antennemet-achterliggende-caviteit (Engels: 'cavity-backed slot antenna', 'CBSA') topologie. Op die manier worden de voordelen van de CBSA topologie, namelijk een hoge stralings efficiëntie en een hoge isolatie tussen antenne en integratieplatform, gecombineerd met de voordelen van planaire antennetechnologie, namelijk een laag profiel, een lage fabricagekost en eenvoudige integratie met andere elektronica-componenten. Verder worden twee hybride modes geëxciteerd en samengevoegd om de impedantiebandbreedte te verhogen, terwijl de symmetrie van deze hybride modes uitgebuit wordt om het ontwerp te miniaturiseren. Twee nieuwe antenne(rooster)s worden voorgesteld om het potentieel van deze ontwerpstrategie aan te tonen. Eerst introduceren we een compact antennerooster dat bestaat uit drie antenne-elementen. Hierbij wordt de anders ongebruikte oppervlakte binnen meubels aangewend om onzichtbare integratie mogelijk te maken. Daarna stellen we een geminiaturizeerde antenne voor die gebruik maakt van het beschikbare materiaal in kurk vloer- en wandtegels om onzichtbare integratie in een intelligente vloer of wand te bekomen. Metingen tonen aan dat beide ontwerpen een hoge antennewinst en stralings efficiëntie vertonen over een zeer hoge bandbreedte in een realistische IoT omgeving. Dit onderstreept de sterkte van deze ontwerpmethode.

Hoofdstuk 3 gaat dieper in op het antennerooster dat ontworpen is in Hoofdstuk 2. We stellen richtlijnen op om dat antennerooster te integreren in een bureau, om zo een stabiele, zeer snelle 3 x 3 MIMO (Engels: 'multiple-input multiple-output') draadloze communicatie verbinding op te zetten met een mobiele gebruiker die op de desbetreffende bureau is geplaatst. Het uiteindelijke doel van deze onderzoeksinspanning is om een zeer hoge datasnelheid aan te bieden aan elke deelnemer van een vergadering of om een gebruiksvriendelijker alternatief aan te bieden voor bedrade basisstations in een intelligente thuisomgeving. Metingen uitgevoerd in een realistische opstelling hebben aangetoond dat er een hoge multiplexeringwinst wordt behaald over een zeer hoge bandbreedte, en dit voor verschillende posities en oriëntaties van de mobiele gebruiker. Deze winst kan enerzijds gebruikt worden om het zendvermogen te reduceren of om de datasnelheid te verhogen. Bovendien is er, dankzij het specifieke ontwerp van het antennerooster, geen kennis over het kanaal nodig bij de verzender. Dit vermindert de complexiteit van het signaalverwerkingsalgoritme en de responstijd, aangezien er geen terugkoppeling meer nodig is.

Het tweede deel van dit werk is gewijd aan een holistische ontwerpstrategie om een nieuwe generatie van autonome, betrouwbare en onopvallende intelligente

textielsystemen te implementeren. Deze actieve antennes zijn in staat om een draadloze communicatieverbinding op te zetten en in stand te houden in een uitdagende, en soms vijandige, IoT omgeving, zonder hierbij telkens de batterij te moeten herladen.

In Hoofdstuk 4 wendden we de inzichten die verkregen zijn in Hoofdstuk 2 aan om een draagbare, ultra-breedbandige (Engels: 'Ultra-wideband', 'UWB') textielantenne te onwikkelen die werkzaam is in de [3.4-4.8] GHz UWB band. Ons ontwerp is gebaseerd op koperen zeilringen en textielmaterialen om een flexibele, lichte en vlakke UWB antenne te verkrijgen die onopvallende integratie in kledij toelaat, zonder de gebruiker te hinderen. Metingen bewijzen niet enkel een zeer hoge isolatie tussen de antenne en het menselijke lichaam, maar ook zeer stabiele werking wanneer de antenne gebogen wordt, zoals in realistische situaties.

In het daaropvolgende hoofdstuk bieden we een oplossing voor twee hoofdbekommernissen van ontwerpers van intelligente textielsystemen: betrouwbaarheid en autonomie. Daarvoor combineren we het potentieel van energie-oogstsystemen (Engels: 'energy-harvesting systems') met een betrouwbare, energie-efficiënte draadloze communicatieverbinding die opgezet wordt door een zorgvuldig ontworpen textiel antennesysteem. In het bijzonder ontwerpen we een draagbare textielantenne die zowel werkt in de 2.45 GHz ISM band als in de 4G-LTE-band-7. Op dit antenneplatform wordt een systeem geïntegreerd dat in staat is om zonne-energie te winnen. Het tweebandige karakter van het ontwerp reduceert de probabilliteit op het verliezen van de draadloze verbinding in de heterogene IoT omgeving, en verbetert zo niet enkel de betrouwbaarheid maar ook de gebruiksvriendelijkheid. Door middel van een aangepaste ontwerpstrategie hergebruiken we vervolgens de antenne-oppervlakte voor het opwekken van DC vermogen. Hier voor wordt een flexibel vermogensbeheer- en energieopslagsysteem geïntegreerd op de achterkant van de antenne en een flexibele zonnecel op de voorkant van de antenne. Door de specifieke antennetopologie wordt het aantal benodigde DC-verbindingdraden geminimaliseerd evenals hun lengte, zonder hierbij in te boeten aan stralingsperformantie. Dit wordt gevalideerd door antennewinst- en reflectiecoëfficiëntmetingen in de vrije ruimte te vergelijken vóór en na integratie van deze extra hardware. De prestatie van de volledige module wordt vervolgens gevalideerd in realistische omstandigheden door enerzijds op te meten hoeveel zonne-energie we kunnen oogsten in een buitenomgeving en door anderzijds het stralingspatroon en de reflectiecoëfficiënt op te meten wanneer de module geplaatst is op het menselijke lichaam.

Hoofdstuk 5 beschreef reeds een belangrijke stap in de richting van een hogere betrouwbaarheid en grotere systeemautonomie. Het is echter duidelijk dat wanneer energie slechts gewonnen wordt van één energiebron, er gevaarlijke situaties kunnen ontstaan als deze niet langer beschikbaar is. Denk aan een reddingswerker die vertrouwt op zonne-energie om het systeem dat zijn vitale parameters opvolgt te voorzien van stroom tijdens een interventie in een ondergrondse parkeergarage. Het is duidelijk dat een hybride energie-oogstproces, waarbij gelijktijdig energie

gecollecteerd wordt van verschillende energiebronnen, noodzakelijk is om dergelijke situaties te vermijden. Daarom gaan we in Hoofdstuk 6 dieper in op de mogelijkheid om textielantennes te gebruiken als een platform voor hardware die meerdere energievormen gelijktijdig omzet in elektrische energie en deze vervolgens op een intelligente manier beheert. Als startpunt bespreken we de vier primaire energiebronnen en de bouwstenen die nodig zijn om energie te oogsten van deze bronnen. Dan bestuderen we draagbare antennenetologieën die de integratieprocedure ondersteunen of vereenvoudigen. Bovendien wordt een stappenplan opgesteld om te voorkomen dat de integratie van deze extra hardware invloed heeft op de prestaties van de antenne. Uiteindelijk wordt er een antenne/hybride energie-oogststelsel co-ontwerpprocedure voorgesteld die in staat is om de voordelen van beide technologieën te combineren, zonder wederzijdse negatieve beïnvloeding. De kracht en voordelen van deze aanpak worden dan aangetoond door de realisatie van een compact intelligent textielsysteem, waarbij een flexibel hybride energie-oogststelsel wordt geïntegreerd op een draagbare SIW CBS textielantenne. Drie verschillende actuatortechnieken worden aangewend om energie te oogsten en te combineren van zonlicht, kunstmatig licht en de lichaamswarmte van de gebruiker. Deze ontwerpstrategie is gevalideerd door antennenparameters te vergelijken vóór en na integratie van deze extra hardware. Verder wordt het potentieel van het hybride energie-oogststelsel geïntegreerd in realistische binnen- en buitenomstandigheden. Hiermee wordt aangetoond dat het geïntegreerde hybride energie-oogststelsel toelaat om energie ter beschikking te bestellen in de meeste situaties, zowel binnen als buiten. Het is echter belangrijk te melden dat optimale energiewinning slechts verkregen kan worden als de energiebronnen gekozen worden in functie van de toepassing en wanneer het achterliggende energiebeheersysteem afgestemd wordt op zowel het vermogenprofiel van het intelligente textielsysteem als van de geselecteerde energie-omzetters.

Daarom gebruiken we in het laatste hoofdstuk van dit proefschrift de co-ontwerpprocedure voorgesteld in Hoofdstukken 5 en 6 als de basis voor een nieuwe holistische ontwerpmethodiek voor autonome, intelligente textielsystemen, waarin de textielantenne de sleutelcomponent vormt om optimale prestaties te bewerkstelligen. Verder worden de energiebronnen waarvan energie wordt geoogst, gekozen als functie van de toepassing en is het vermogenbeheersysteem op maat gemaakt om het energieverbruik van de draadloze communicatiemodule af te stemmen op de energiewinning. Vervolgens wordt deze nieuwe strategie toegepast om een volledig nieuwe autonome en draagbare RFID tag te ontwikkelen die werkzaam is in de 2.45-GHz RFID SHF band. Het ontwerp is gebaseerd op een circulaire patchantenne vervaardigd uit textiel, waarbij zeilogen gebruikt worden om het stralingspatroon op maat te maken voor optimale prestaties in het concept van een intelligente vloer of plafond. De eigenschappen van dit toepassings-specifieke antenne-ontwerp worden dan uitgebuit om sensoren, microcontroller en transceiver te integreren, evenals de hardware die nodig is om energie te winnen uit de omringende energiebronnen, en dit met een minimum aan fragiele en verlieshebbende verbindingsdraden. Kort samengevat levert deze nieuwe aanpak een

RFID tag die gekenmerkt wordt door een uitstekend comfort voor de gebruiker, een zeer hoog uitleesbereik, flexibele interfacing met verschillende analoge en digitale sensoren, uitgebreide functionaliteit, en een zeer hoge operationele autonomie.

Summary

In the near future, the ‘Internet of Things’ will bring a massive change to the way we live and work nowadays. Fueled by the adaption of novel key-enabling technologies, common objects, tools, machinery, and even garments, will be augmented with sensing, processing, and wireless communication capabilities, allowing them to understand and respond to their context and environment. By integrating these smart objects into the internet, billions of everyday objects surrounding us will provide a constant dataflow, helping us to take better decisions in all aspects of our lives. It will improve our awareness of our surroundings and of our physical condition. Moreover, it will enable us to control our surroundings in ways that we cannot fully imagine today.

Smart surface technology, and more in particular smart-fabric interactive-textile (SFIT) systems, play an important role within the vision of the Internet of Things. These body-centric systems, in which the functionality of traditional garments is extended by seamless integration of sensing, actuating and computing functionalities, leverage pervasive quantification of the wearer’s physical conditions and his/her interaction with the environment. This technology offers exciting new opportunities to improve the wearer’s capabilities in a plethora of application areas, without overburdening the wearer with additional pieces of equipment that have to be carried around. For instance, in critical professional applications, SFIT systems facilitate vital sign monitoring, localization and remote coordination of first responders or firefighters during their intervention. It helps to safe-guard their lives and, hence, also the lives of the persons in distress. Using SFIT systems in healthcare improves quality of life of patients and elderly people by facilitating home care and independent living, in the meantime reducing healthcare costs for the society. Recently, other smart surface related concepts, such as smart floors, smart wall papers, and smart ceilings, were developed, making the interaction between man and infrastructure even more seamless to the user.

The work presented in this dissertation focuses on two fundamental technological challenges related to antenna system design for the Internet of Things. The first part of this thesis is primarily concerned with antenna system design for invisible and robust integration within smart floors, ceilings and desk configurations. Special attention was devoted to establishing reliable, high data rate ultra-short-range wireless communication.

In Chapter 2, we face the challenging set of design requirements related to the practical realization of invisibly integrated (multi-)antenna systems, capable of supporting the data speed levels required by the next-generation multimedia applications. Therefore, the substrate integrated waveguide (SIW) implementation

technology is combined with the cavity-backed slot antenna topology. In doing so, the advantages of the latter, being excellent radiation efficiency and a high antenna-to-integration-platform isolation, are combined with the benefits of planar antenna technology, being low-profile, low cost and easy integration with planar circuitry. Then, two hybrid modes are excited and merged to enhance bandwidth, whereas miniaturization is obtained by relying on the symmetry of both hybrid modes. Two novel antenna (array) designs are introduced to demonstrate the potential of this design approach: a compact, ultra-wideband three-element antenna array for invisible integration into furniture, exploiting the otherwise unused area, and a miniaturized ultra-wideband single element antenna design that exploits the readily available material of cork floor and wall tiles to enable invisible integration in a smart floor or wall. Measurements demonstrate a high gain and large radiation efficiency over an ultra-wide bandwidth in a realistic IoT environment, underlining the strength of this design approach.

Chapter 3 elaborates on the three-element antenna array designed in Chapter 2. More in particular, we provide guidelines to embed the antenna array into a desk to set up a stable, high data-rate ultra-short-range 3 x 3 MIMO wireless communication link with a mobile user (MU) on top of that worktop. The main idea consists of offering a high data-rate wireless connection to each participant of a meeting or providing a user-friendly alternative for wired docking stations in a smart home environment. Measurements in a realistic environment have revealed a high multiplexing gain over a wide bandwidth for different relative orientations and positions of the MU. This gain can be exploited to reduce power consumption and/or to increase the data rate. In addition, it was shown that an ultra-short-range MIMO channel implemented by our three-element array does not require channel knowledge at the transmitter. This reduces latency and signal processing complexity, since no feedback is required.

Part two of this dissertation focuses on the need for a holistic design approach to develop a new generation of autonomous, reliable and unobtrusive SFIT systems, which are capable of establishing and maintaining wireless communication in the harsh and hostile IoT environment without the burden of frequent battery recharging.

In Chapter 4, we exploit the insights gained in Chapter 2 to design a wearable ultra-wideband (UWB) textile antenna for operation in the low-duty cycle restricted [3.4-4.8] GHz UWB band. Our design relies on copper tubular eyelets and textile materials to realize a conformal, light-weight and low-profile UWB cavity-backed slot antenna. Experimental validation shows a very high antenna-to-human-body isolation and stable performance under realistic bending conditions.

In the next chapter, we address two key concerns of SFIT system designers: reliability and autonomy. Therefore, we combine the potential of harvesting energy with setting up a reliable, energy-efficient wireless communication link, implemented in a well-designed textile antenna system. In particular, a wearable textile antenna with integrated solar energy harvester is presented for operation

in the 2.45-GHz-ISM band and the 4G-LTE-band-7. The design relies on a textile dual-band SIW cavity-backed slot antenna to reduce the probability of being disconnected in the highly heterogeneous IoT environment, hence, enhancing reliability and user friendliness. By means of a dedicated design strategy, the surface required by the antenna is then reused for DC-power generation by embedding a power management module and an energy-storage device in the antenna feed plane and a flexible photovoltaic module in the antenna slot plane. In addition, the SIW cavity-backed slot antenna topology minimizes the amount and the length of DC wires, without affecting radiation performance. The latter was validated by comparing free-space gain and reflection coefficient measurements of the antenna with and without energy-harvesting hardware. Performance of the solar wearable textile antenna was validated in realistic conditions by carrying out on-body gain pattern measurements, on-body return loss measurements and by measuring the solar harvesting potential in a realistic environment.

Chapter 6 described already an important step along the long road towards a higher reliability and extended system autonomy. Yet, it is clear that harvesting energy from only one ambient energy source could lead to dangerous situations when this source is no longer available. Just think of a first responder relying on solar energy to power his vital sign monitoring system during an intervention in an underground parking lot. Indeed, a hybrid energy harvesting approach, in which energy is simultaneously scavenged from different energy sources, is necessary to avoid such events. Therefore, Chapter 7 elaborates on the exploitation of the textile antenna as a platform for hybrid-energy-harvesting and power-management hardware. As a starting point, the four primary energy sources are discussed in a body-centric context and the building blocks required to harvest from these sources are outlined. Then, wearable antenna topologies that facilitate the integration procedure are reviewed and an action plan to avoid reduction in antenna performance due to the additional hardware is proposed. Finally, an antenna/hybrid-harvester co-design paradigm is proposed that combines the advantages of both key-enabling technologies without reciprocal detrimental effects. The merits and strength of this paradigm are demonstrated through the realization of a compact and highly-integrated SFIT system, in which a flexible hybrid energy-scavenging system is embedded on a wearable SIW cavity-backed textile slot antenna. Three different actuation techniques are exploited to combine the energy from natural solar light, artificial light and the wearer's body heat. Comparison of the antenna parameters before and after integration of this additional hardware reveals no significant performance degradation, validating this design approach. Furthermore, the energy-harvesting potential was verified in realistic indoor and outdoor conditions. It is shown that the embedded hybrid-energy harvester enables scavenging in most indoor and outdoor situations. Yet, it is important to mention that optimal energy-harvesting only can be obtained when the diverse energy sources are chosen as a function of the application and when the power management system is tailored to the power profile of both the SFIT module and the selected energy-harvesting transducers.

Therefore, in the last chapter of this dissertation, the antenna/harvester co-design paradigm is used as the base for a novel holistic microwave system design paradigm, in which the antenna forms the central component to obtain peak performance. The ambient energy source(s) is(are) selected based on the application. The power management system is tailored to fit the power consumption profile of the wireless communication module on the power generation profile of the energy-harvesting transducer(s). This novel paradigm was applied to realize a novel autonomous wearable radio-frequency identification (RFID) tag for operation in the 2.45-GHz RFID super high frequency (SHF) band. The tag relies on a textile circular patch antenna with tubular eyelets that tailor its radiation pattern for application in a smart floor/ceiling concept. The characteristics of the antenna topology are then exploited to embed sensing, computing, transceiver, and energy-harvesting hardware, without fragile and lossy interconnections. In summary, the holistic design approach leveraged a RFID tag that features excellent wearability, very high read range, enhanced functionality, interfacing with diverse analog or digital sensors, and extended system autonomy.