



UNIUNEA EUROPEANĂ



GUVERNUL ROMÂNIEI



Fondul Social European
POSDRU 2007-2013



Instrumente Structurale
2007-2013



MINISTERUL
EDUCAȚIEI
NAȚIONALE
OIPOSDRU



Optimizarea transferului de putere pentru sistemele de identificare prin radiofrecvență ce funcționează în medii metalice

- raport cercetare intermediar -

Domeniul:
Inginerie electronică și telecomunicații

Cercetător post-doctoral,
asist. univ. dr. ing. **Adrian-Ioan PETRARIU**

- Suceava 2014 -

Cuprins

Cuprins	<i>i</i>
Listă de figuri	<i>ii</i>
Listă de tabele	<i>iii</i>
1. Introducere	1
2. Soluții existente privind optimizarea transferului de putere pentru sistemele RFID ce funcționează în medii metalice	7
2.1. Domeniul HF	7
2.2. Domeniul UHF	11
3. Concluzii	22
Bibliografie	24

Listă de figuri

Figura 1.1 Apariția curenților eddy într-un plan metalic	3
Figura 1.2 Modelul unui tag RFID.....	3
Figura 1.3 Răspunsul în frecvență al unei antene RFID în proximitatea mediilor metalice [10]	4
Figura 1.4 Frecvența de rezonanță vs. variația distanței între antenă și un plan metalic	5
Figura 2.1 Corectarea frecvenței de rezonanță pentru un tag RFID [16]	7
Figura 2.2 Efectul foliei de ferită asupra câmpului magnetic	7
Figura 2.3 Prototip de tag pentru medii metalice [16]	8
Figura 2.4 Prototip de antenă pentru cititor cu plan metalic permanent [19]	10
Figura 2.5 Structura unei antene microstrip [22]	11
Figura 2.6 Diverse tipuri de antene microstrip [24].....	12
Figura 2.7 Prototipuri de tag-uri RFID [24]	12
Figura 2.8 Prototip pentru un tag ce folosește antenă microstrip [25]	13
Figura 2.9 Prototip Y-Y al unui tag RFID [26].....	14
Figura 2.10 Dimensiunile necesare pentru WinTag [28]	14
Figura 2.11 Model pentru tag RFID [32]	16
Figura 2.12 Scenariu pentru folosirea unui container metalic prevăzut cu tag RFID [33]	17
Figura 2.13 Structură tag RFID omnidirecțional [33]	17
Figura 2.14 Prototip de tag UHF ce folosește material absorbant [34]	18
Figura 2.15 Testarea experimentală a grosimii de material absorbant [34]	18
Figura 2.16 Structură tag RFID flexibil [13]	19
Figura 2.17 Antenă flexibilă tip „patch” [14]	20
Figura 2.18 Antenă RFID flexibilă cu substrat din material ceramic [35].....	20
Figura 2.19 Reprezentarea directivității unei antene în domeniul UHF [37].....	21
Figura 2.20 Simulări ale câmpului electromagnetic pentru o antenă UHF-RFID [38].....	21

Listă de tabele

Tabelul 2-1 Distanțe maxime de citire cu și fără plan metalic.....	12
Tabelul 2-4 Distanța maximă de citire măsurată [m]	13
Tabelul 2-5 Dimensiunile parametrilor WinTag [28]	15
Tabelul 2-6 Distanța maximă de citire în raport cu orientarea WinTag-ului	16
Tabelul 2-7 Distanța de citire a tag-ului ALR'M foam [m].....	19

1. Introducere

Tehnologia RFID (Radio Frequency IDentification), sau de identificare prin radiofrecvență, a beneficiat în ultimii ani de o dezvoltare rapidă, fapt ce a condus la apariția numeroaselor aplicații utilizate în aproape orice domeniu. Această creștere rapidă a apărut după introducerea conceptului EPC (Electronic Product Code), ce impune ca orice produs comercializat să dețină atât informații atașate pe ambalajul acestuia, cât și informații asociate respectivului produs, informații stocate în baze de date locale sau globale [1].

Astfel, prin introducerea conceptului EPC fiecare produs ce are atașat un tag RFID devine unic. Deoarece informațiile stocate de tag-ul RFID atașat fiecărui produs nu necesită un volum mare de memorie, costul de producție pentru respectivul tag este relativ scăzut (câțiva cenți).

Principiul de funcționare a sistemelor RFID are la bază schimbul de informații dintre un cititor (întâlnit și sub numele de interogator) și un tag RFID (format dintr-un cip și o antenă), pe care în continuare îl vom numi simplu tag, atașat de obiectul ce trebuie identificat.

Benzile de frecvență la care aceste sisteme RFID funcționează sunt reglementate de fiecare țară după prevederile proprii. Astfel, întâlnim sisteme RFID funcționând în domeniile de joasă frecvență (LF), înaltă frecvență (HF), foarte înaltă frecvență (UHF) și microunde (MW).

Dezvoltarea tehnologiei RFID s-a produs rapid, ajungându-se de la aplicații simple folosite pentru inventariere și antifurt la aplicații folosite în industria auto, logistică, managementul depozitelor, etc.

De asemenea această tehnologie este folosită și în domenii precum cel militar, medical, agricol, fiind tot mai des întâlnită în lanțurile de producție și pentru trasabilitatea produselor.

Odată cu dezvoltarea acestor sisteme RFID pentru diferite domenii, au apărut și unele probleme sau neajunsuri, unele dintre cele mai semnificative fiind:

- degradarea performanțelor de funcționare datorită prezenței materialelor metalice, lichide sau dielectrice care afectează comunicația între cititor și tag-ul atașat de produsul ce trebuie identificat;
- realizarea tag-urilor de dimensiuni cât mai mici pentru a putea identifica orice produs aflat în comerț;
- asigurarea încadrării în standardele referitoare la compatibilitatea electromagnetică;
- asigurarea unui nivel ridicat de securitate și de confidențialitate a utilizatorilor;

- administrarea și stocarea unui volum mare de date provenite de la obiectele etichetate cu tag-uri, într-un timp cât mai scurt.

Aceste aspecte prezentate mai sus sunt discutate și analizate la momentul actual, încercând să se găsească soluții în diminuarea sau chiar în eliminarea lor.

Dintre toate sistemele RFID amintite, cele folosite în domeniile de joasă, respectiv înaltă frecvență (LF, respectiv HF) funcționează cel mai bine în proximitatea mediilor lichide și a țesuturilor vii [2]. Când luăm în considerare, prin comparație, viteza de comunicație a informației și distanța maximă de operare a sistemelor RFID din domeniile amintite mai sus (adică LF și HF), cele din gama HF predomină, fiind în prealabil folosite peste tot în lume.

Un alt avantaj în folosirea sistemelor RFID din domeniul HF la nivel global este dat de banda de frecvență, care este liberă, nefiind necesară pentru utilizare achiziționarea unei licențe în spectrul radio. De asemenea, datorită utilizării doar a unei singure frecvențe centrale, și anume 13,56 MHz, sistemele RFID din acest domeniu de frecvență sunt compatibile la nivel global, putând fi folosite cu ușurință de oricine în aplicații multiple.

Chiar dacă funcționează bine în proximitatea mediilor lichide și a corpului omenesc, sistemele RFID din domeniul HF prezintă disfuncționalități când în jurul lor se află medii metalice [3-5]. Aceste sisteme folosesc, pentru a realiza schimbul de informații, cuplajul inductiv între antena cititorului și antena tag-ului. Prin acest cuplaj, câmpul magnetic generat de antena cititorului alimentează cu energie tag-ul atașat pe un produs ce trebuie identificat. Odată ce acest tag primește energia necesară activării cipului, aceasta va transmite informațiile despre produsul respectiv către un interogator sau un cititor.

Prin urmare, câmpul magnetic necesar pentru realizarea schimbului de informații este foarte important, fiind elementul cheie în funcționarea întregului sistem RFID [6].

Conform legii lui Lenz, dacă într-un câmp magnetic este introdus un plan metalic, pe respectiva suprafață vor apărea curenți eddy, ce vor genera un câmp magnetic egal și de sens opus câmpului magnetic generator (vezi Figura 1.1). Astfel, liniile de câmp magnetic ce se deplasează ortogonal pe suprafața planului metalic vor fi deviate în linii de câmp ce se deplasează tangențial cu suprafața metalică. Regiunea unde se produce devierea maximă a liniilor de câmp se află în imediata apropiere a suprafeței metalice [7, 8].

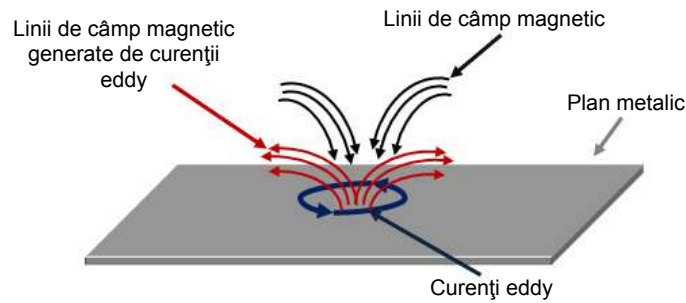


Figura 1.1 Apariția curenților eddy într-un plan metalic

Apariția acestui fenomen în sistemele RFID, poate fi observat în momentul în care antena unui tag este orientată paralel cu o suprafață metalică (vezi Figura 1.2). Datorită celor menționate mai sus, acesta nu va putea funcționa corespunzător datorită energiei insuficiente care ajunge la nivelul cipului, energie provenită din câmpul magnetic generat de antena cititorului.

Practic, respectivul tag nu mai are suficiente linii de câmp magnetic care să treacă prin spirele bobinei ce alcătuiește antena și să inducă energie la nivelul cipului pentru a fi activat și pentru a transmite informațiile cerute de către cititor.

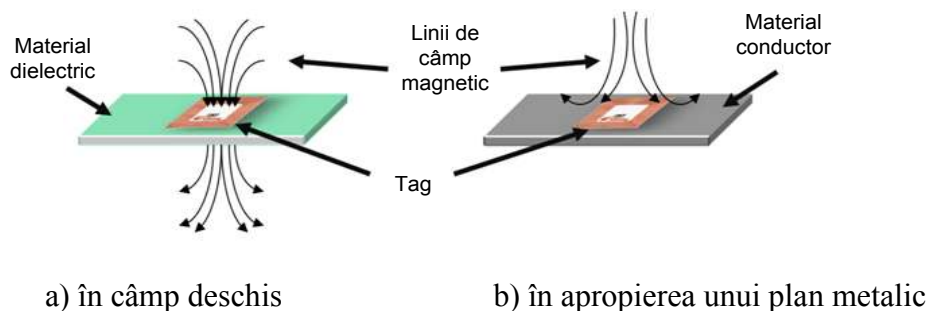


Figura 1.2 Modelul unui tag RFID

Odată cu apariția câmpului magnetic generat de curenții eddy, fluxul magnetic generat de antenă va scădea, ducând astfel la o diminuare a inductanței acesteia (relația (1.1)).

$$L = \frac{\Psi}{I}, \quad (1.1)$$

unde Ψ reprezintă fluxul magnetic, L inductanța, iar I curentul prin respectiva antenă.

Drept urmare, diminuarea inductanței va produce un dezechilibru în frecvența de rezonanță a respectivului tag, frecvență exprimată prin intermediul relației (1.2).

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (1.2)$$

unde f_0 , L , C reprezintă frecvența centrală de rezonanță, inductanța, respectiv capacitatea echivalentă a circuitului de antenă. Acest dezechilibru produce o degradare a distanței de citire a tag-urilor, o degradare care poate fi totală, dacă mediul metalic este la o distanță foarte mică (de ordinul mm) de antenă.

Influența mediilor metalice asupra unei antene RFID din domeniul HF poate fi regăsită în [9-11] unde se face o analiză a modificării frecvenței de rezonanță pentru un sistem RFID atunci când antena cititorului sau tag-ul folosit pentru realizarea comunicației se află în prezența unui plan metalic.

Figura 1.3 indică aceste aspecte legate de schimbarea frecvenței de rezonanță a circuitului de antenă odată cu schimbarea distanței între aceasta și un plan metalic. La doar 2 cm distanță între antenă și un plan metalic, se poate observa un dezacord accentuat al frecvenței centrale pentru circuitul de antenă, atingând valoarea de 15,12 MHz (frecvența centrală a sistemului fiind de 13,56 MHz). Acest dezacord face ca circuitul rezonant al tag-ului să nu mai poată capta suficientă energie pentru a putea alimenta cipul și a transmite informațiile cerute de către cititor. Pentru antena folosită de către cititorul RFID, acest dezacord produce o atenuare a câmpului magnetic transmis către tag.

O dată cu creșterea distanței dintre antenă și planul metalic, frecvența de rezonanță a antenei se apropie de frecvența de lucru a sistemului, adică 13,56 MHz în cazul unui sistem RFID din domeniul HF. Deplasarea frecvenței de rezonanță față de frecvența de lucru proiectată se datorează evident modificării inductanței L a antenei în prezența mediului metalic din proximitate, aspect evidențiat în Figura 1.3.

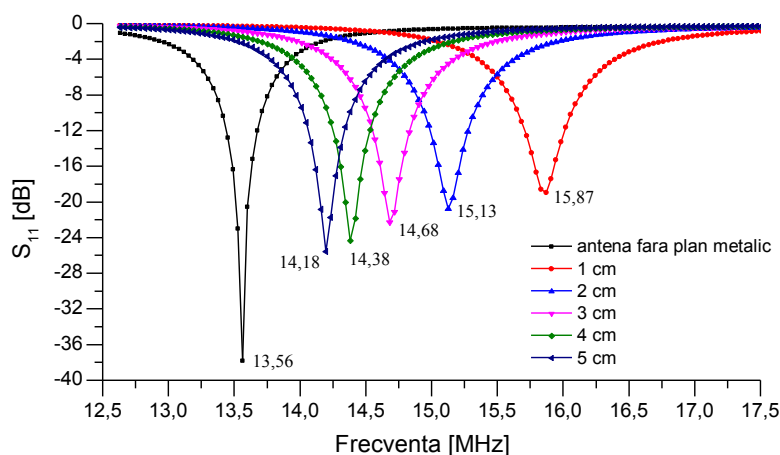


Figura 1.3 Răspunsul în frecvență al unei antene RFID în proximitatea mediilor metalice [10]

Figura 1.4 evidențiază mai clar acest aspect al decalării frecvenței de rezonanță o dată cu modificarea distanței dintre antenă și planul metalic.

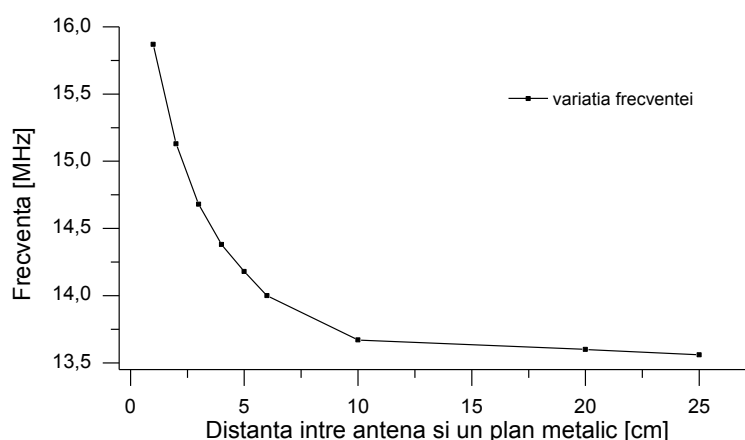


Figura 1.4 Frecvența de rezonanță vs. variația distanței între antenă și un plan metalic

Rezolvarea acestor efecte pentru tag-uri poate fi realizată ușor, prin introducerea unui mediu absorbant între acestea și suprafața metalică. Aceste medii absorbante vor ghida liniile de câmp magnetic către cip, și astfel este posibilă comunicația cu cititorul. Folosirea acestor medii absorbante în cazul antenelor pentru cititoarele RFID **crește costul de implementare** a respectivului sistem RFID. Prin urmare, trebuie găsite alte metode de a rezolva acest aspect.

Sistemele RFID din domeniul UHF sunt tot mai des folosite pentru administrarea produselor în depozite și pentru trasabilitatea acestora. Cu toate că aceste sisteme RFID prezintă o viteză de transfer a informației și o distanță de operare mult mai mare decât sistemele din domeniul HF, prezența mediilor metalice în proximitatea lor are un efect destul de pronunțat [12]. Soluțiile existente până în prezent în îmbunătățirea performanțelor acestor sisteme RFID presupun implementarea unor antene care prezintă imunitate în fața mediilor metalice. Cele mai utilizate antene sunt cele microstrip, ce au un plan metalic în structura lor. Unele dintre aceste antene **sunt dificil de realizat**, având nevoie de găuri de trecere pentru a face legătura între structura radiantă a antenei și planul metalic aflat la o anumită distanță de aceasta.

În ultimii ani au apărut o multitudine de modele pentru aceste tipuri de antene, însă structura lor împiedică folosirea acestora în anumite aplicații. De exemplu, atunci când dorim să identificăm obiecte ale căror formă variază, de la structuri dreptunghiulare, la cele conice, circulare sau cilindrice, folosirea structurilor existente nu ne ajută prea mult. Au apărut însă și câteva modele de etichete RFID care iau în calcul acest aspect, însă dimensiunea lor este relativ ridicată, de la aproximativ 7cm [13] până la peste 10 cm [14], [15].

Îmbunătățirea funcționării sistemelor RFID în proximitatea mediilor metalice ar putea crește domeniul de aplicabilitate al acestora. Un exemplu poate fi industria auto, unde tehnologia RFID ar putea fi folosită pentru urmărirea trasabilității pieselor auto, piese care în marea lor parte sunt realizate din materiale metalice. Un alt exemplu poate fi cel întâlnit în managementul depozitelor unde structurile pe care sunt așezate produsele ce trebuie identificate sunt construite din metal sau în domeniul medical unde este necesară etichetarea ustensilelor metalice din blocul operator.

2. Soluții existente privind optimizarea transferului de putere pentru sistemele RFID ce funcționează în medii metalice

2.1. Domeniul HF

Luând în calcul literatura de specialitate, primele aspecte legate de diminuarea efectelor cauzate de mediile metalice și optimizarea transferului de putere asupra sistemelor RFID din domeniul HF sunt întâlnite în [16], unde autorii încearcă să aducă o îmbunătățire asupra tag-ului RFID. După o analiză făcută asupra frecvenței de rezonanță a acestui element component al sistemului RFID în proximitatea unui mediu metalic, aceștia constată că la doar 1 cm între tag și planul metalic, frecvența de rezonanță a acestuia crește cu mai mult de 1 MHz. Rezolvarea decalării frecvenței de rezonanță a tag-ului a fost făcută prin simpla adăugare a unui condensator variabil în circuit și calibrarea acestui tag pe frecvența de lucru a cititorului, dar numai în condiții particulare, adică atunci când se cunoaște aria suprafeței metalice și distanța la care se află față de respectivul tag (vezi Figura 2.1).

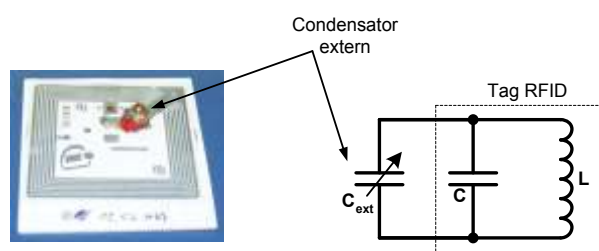


Figura 2.1 Corectarea frecvenței de rezonanță pentru un tag RFID [16]

Cu toate că acordul între tag și cititor a fost rezolvat prin ajustarea frecvenței de rezonanță a tag-ului, distanța de citire a rămas destul de mică, fiind de 10 cm la o putere emisă de antena cititorului de 4 W. Aceasta se datorează în mare parte curenților eddy implicați. Pentru a rezolva această problemă, [16] au introdus între tag și planul metalic un mediu absorbant, adică o folie de ferită.

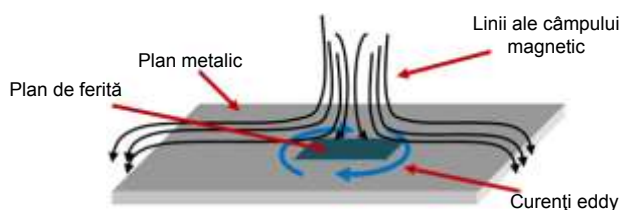


Figura 2.2 Efectul foliei de ferită asupra câmpului magnetic

Acest material împiedică formarea curenților eddy și de asemenea ghidează câmpul magnetic spre antena tag-ului (vezi Figura 2.2).

În timp ce metalul scade inductivitatea bobinei, ferita realizează o creștere a acesteia, datorită permeabilității magnetice μ_r [17]. Prin folosirea foliei de ferită, frecvența de rezonanță se schimbă din nou, fiind nevoie de o nouă ajustare a acesteia.

Odată sincronizată frecvența de rezonanță cu cea de la cititorul RFID, factorul de calitate al circuitului rezonant va crește, conform relației (2.1).

$$Q \approx \sqrt{\frac{C}{L}} \quad (2.1)$$

Acest lucru poate fi unul benefic, deoarece crește sensibilitatea tag-ului și odată cu aceasta crește și distanța de citire. Pe de altă parte, lățimea de bandă a circuitului rezonant (relația (2.2)) scade, iar respectivul tag se va decalibra mult mai repede odată cu apariția în proximitate a unor medii metalice.

$$Q = \frac{f_0}{BW} \quad (2.2)$$

Ținând cont de cele amintite, [16] propun un nou model de tag care poate fi folosit în proximitatea mediilor metalice, capabil să ofere o distanță de citire comparabilă cu aceea a tag-ului folosit în absența acestor medii perturbatoare. Aceștia folosesc drept suport pentru realizarea tag-ului o plachetă de ferită peste care realizează o antenă din bandă de cupru la care se atașează un cip pentru domeniul de frecvență HF (vezi Figura 2.3).

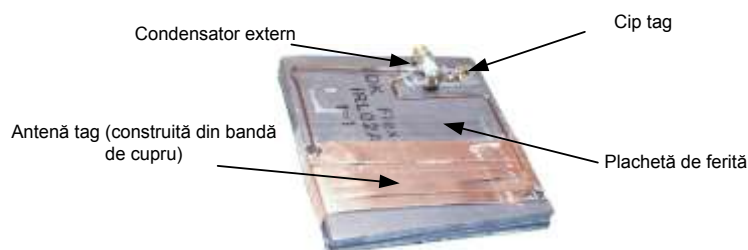


Figura 2.3 Prototip de tag pentru medii metalice [16]

Implementarea și buna funcționare a tag-urilor RFID din domeniul HF atașate pe obiecte metalice a fost oarecum soluționată prin introducerea materialului absorbant între tag și planul metalic.

Multe companii au început să producă și să comercializeze astfel de tag-uri folosite în banda de frecvență HF, însă atunci când se folosește întregul sistem RFID (cititor + tag-uri) într-un mediu complet metalic, prezența doar a tag-urilor confecționate pentru aceste medii nu este îndeajuns. Astfel, rămâne de rezolvat aspectul legat de influența mediilor metalice asupra antenei unui cititor RFID.

În 2009, [3] au realizat un studiu ce vizează în primul rând influența mediilor metalice asupra antenei unui cititor RFID. Pornind de la ideile menționate de [5] și abordând stilul antenei realizate în [18], aceștia au analizat diferite tipuri de plane metalice caracterizate de diferite mărimi și grosimi, și au încercat să scoată în evidență principalele efecte atunci când antena cititorului este atașată de un plan metalic. La fel ca și în cazul antenei tag-ului, antena cititorului este afectată de apariția curenților eddy și de schimbarea frecvenței de rezonanță.

Aceeași analiză întâlnită în [16] este preluată și în [3] pentru a arăta creșterea frecvenței de rezonanță a antenei cititorului RFID odată cu micșorarea distanței dintre respectiva antenă și un plan metalic.

O soluție pentru a diminua aceste efecte, pe care [3] o abordează, presupune implementarea unui model „static” de antenă ce are în componența sa un plan metalic ce asigură o relativă imunitate a antenei la mediile metalice din proximitate, calibrarea acesteia făcându-se o singură dată în momentul instalării (vezi Figura 2.4). Acest lucru face ca orice alt mediu metalic care intră în contact cu noul model de antenă să aibă o influență foarte mică asupra sistemului RFID. Totodată acest nou model aduce și dezavantaje. Odată cu aducerea planului metalic aproape de antena cititorului, distanța de citire scade, deoarece scade valoarea câmpului magnetic generat de aceasta, chiar dacă se mărește puterea de emisie. Respectiva antenă poate fi folosită doar pentru anumite aplicații deoarece va putea realiza comunicația cu tag-urile doar pe o singură direcție, opusă planului metalic.

Tot în 2009, în [19] este propus un model de antenă RFID pentru banda de frecvență HF în vederea diminuării influențelor mediilor metalice asupra sistemelor ce folosesc tehnologia RFID. Acest nou model realizat este propus pentru biblioteci și în special pentru aplicațiile care folosesc rafturi metalice. Drept material dielectric între antenă și planul metalic se folosește spumă de polistiren extrudat, ce are constanta dielectrică aproximativ egală cu 1,07.

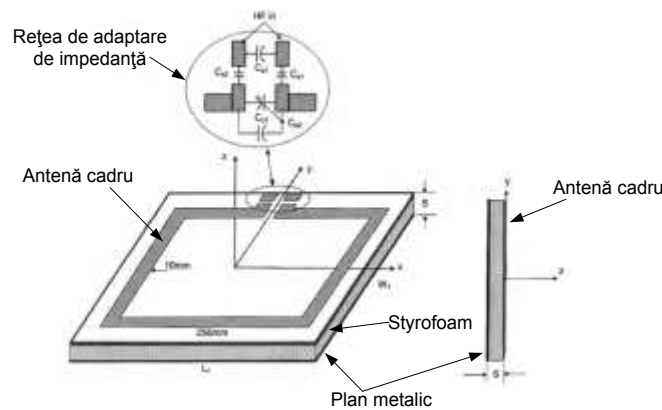


Figura 2.4 Prototip de antenă pentru cititor cu plan metalic permanent [19]

După ce se face o analiză a distanței minime între antenă și planul metalic, se propune acest nou prototip din Figura 2.4, construit pe același fundament teoretic existent ca și în cazul precedent, adică noul model va avea un plan metalic fix și va avea frecvența de rezonanță calibrată pe frecvența de lucru a cititorului la instalarea într-un sistem RFID.

Conform autorilor, noul model de antenă realizat a fost implementat pentru gestiunea cărților dintr-o bibliotecă, oferind o acuratețe de 95% în procesul de identificare.

Un dezavantaj major al acestei structuri de antenă, precum și pentru cea propusă de este unghiul la care pot fi orientate tag-urile pentru a fi identificate. Câmpul magnetic din centrul antenei va fi atenuat datorită apariției curenților eddy în planul metalic din structura fizică a acestui model de antenă. Astfel, procentul de identificare va fi mult mai mic în centru decât în extremități, iar în cazul în care tag-ul este orientat perpendicular cu antena, acest procent de identificare va fi aproape nul în centrul antenei. Un alt dezavantaj este dat de modul în care este calibrată această antenă. Dacă structura planului metalic din componența antenei suferă modificări, sau apar alte medii metalice în proximitate, antena se decalibreză, iar procentul de identificare a tag-urilor va scădea. O eventuală calibrare a antenei presupune utilizarea echipamentelor speciale în acest sens, cum ar fi analizorul vectorial.

Pentru domeniul HF, structurile flexibile de etichete se pot realiza foarte ușor, prin folosirea unui substrat de material absorbant de câmp electromagnetic, cel mai utilizat fiind ferita, după cum este precizat și în [16]. Astfel, luând o etichetă RFID și un plan flexibil de material absorbant, putem obține rezultate satisfăcătoare. De reținut este faptul că respectiva etichetă va trebui calibrată pe frecvența de rezonanță a cititorului pentru a avea un transfer maxim de energie între antenele celor 2 componente ale sistemului [16].

2.2. Domeniul UHF

Soluții privind rezolvarea efectelor produse de mediile metalice și optimizarea transferului de putere asupra sistemelor RFID din gama de frecvență UHF au început să apară încă de la începutul anilor 2003 [20]. Cercetătorii s-au axat la început pe sistemele RFID din acest domeniu de frecvență ce folosesc tag-uri pasive.

La început, s-au analizat efectele care pot să apară atunci când un obiect sau un plan metalic de diferite dimensiuni este atașat sau se află în preajma unui tag din domeniul UHF [21]. După această analiză realizată, autorii au încercat să expună diminuarea acestor efecte într-o lucrare științifică, în care au folosit tag-uri pasive [22]. Respectiv tag-uri au fost realizate folosind-se o antenă microstrip. Avantajele unei astfel de antene sunt numeroase, însă cele mai importante pot fi amintite ca fiind ușurința în implementarea fizică și slabele influențe pe care un mediu metalic le are în preajma acesteia [23].

Ultimul avantaj menționat mai sus este posibil în acest domeniu de frecvență deoarece acest tip de antenă conține în structura ei un plan metalic care ajută la diminuarea efectelor produse de eventualele obiecte metalice aflate în proximitate [21]. Din păcate, astfel de antene au și dezavantaje, printre cele mai importante fiind câștigul mic, factorul de calitate Q mare și lățimea de bandă mică [23].

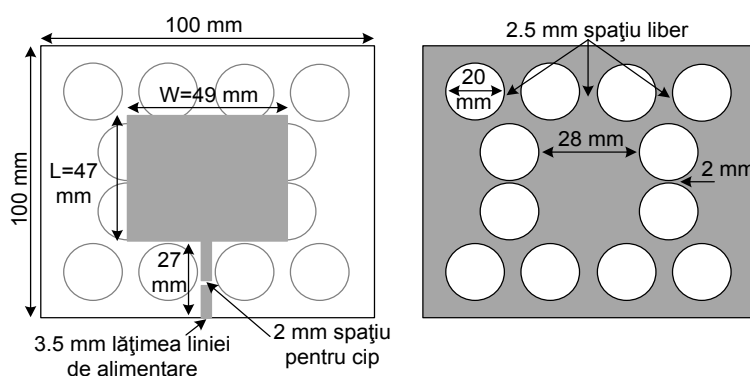


Figura 2.5 Structura unei antene microstrip [22]

O structură de antenă pentru tag-ul pasiv conform celor menționate în este exemplificată în Figura 2.5.

Pentru început, performanțele modelului de antenă au fost analizate prin simulare. Modelul creat a fost atașat de două plane metalice din cupru, având dimensiunile de 200 mm², respectiv 500 mm². Rezultatele obținute de către autori cu privire la distanța de identificare sunt satisfăcătoare și sunt prezentate în Tabelul 2-1.

Tabelul 2-1 Distanțe maxime de citire cu și fără plan metalic

Prototip tag	Fără metal	200 mm ² plan metalic	500 mm ² plan metalic
Antenă microstrip simplă	1,15 m	1,68 m	1,25 m
Antenă cu plan metalic EBG	1,47 m	1,82 m	1,91 m

Notă: EBG - Electromagnetic Band Gap

Urmărind datele prezentate în Tabelul 2-1, se poate observa că distanțe mai mari de citire se obțin în cazul în care antenna folosește EBG, aceasta datorându-se efectelor de suprimare a undelor de suprafață. Cu toate acestea, atât modelul de antenă ce folosește EBG cât și modelul simplu (fără EBG) pot fi folosite pentru un tag pasiv ce își are aplicabilitate în tehnologia RFID folosită în identificarea obiectelor metalice.

Un alt model de antenă este propus în [24], unde la fel ca și în cazul anterior este propusă o antenă microstrip care este simulată în două cazuri: folosind un plan de masă finit și folosind un plan de masă infinit, dispus la o distanță fixă de antenna microstrip. Modelul antenei este prezentat în Figura 2.6, varianta simulată, respectiv Figura 2.7, varianta realizată practic.

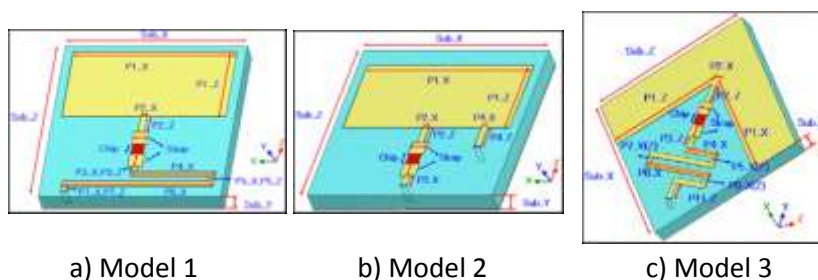


Figura 2.6 Diverse tipuri de antene microstrip [24]

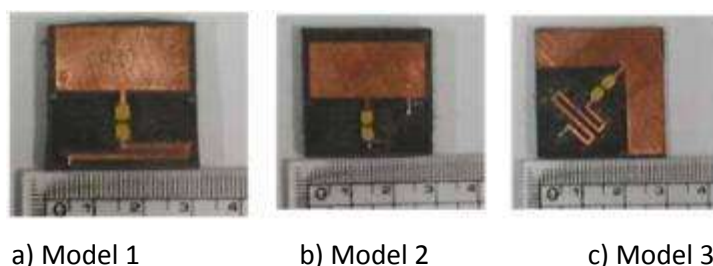


Figura 2.7 Prototipuri de tag-uri RFID [24]

Acest model de antenă, conform autorilor, prezintă o lățime de bandă de 340 MHz, fapt ce conduce la acoperirea întregii benzi de frecvență folosită pentru sistemele RFID din domeniul UHF (860~960 MHz).

Performanța acestor modele de tag-uri este ilustrată prin distanța de citire pe care acestea o oferă. Astfel, în urma simulărilor realizate de către autori, sunt obținute distanțe de citire de 1,7 m, 1,9 m și respectiv 0,85 m, acestea fiind distanțe satisfăcătoare atunci când respectivele tag-uri sunt atașate de obiecte metalice.

În anul 2007, [25] au propus un model de antenă microstrip având ca noutate spre deosebire de celelalte modele amintite, posibilitatea de modificare a lățimii de bandă în care operează. Această modificare a lățimii de bandă este realizată prin ajustarea grosimii fantelor în formă de „I” (vezi Figura 2.8), folosite pentru alimentarea cu energie a cipului RFID.

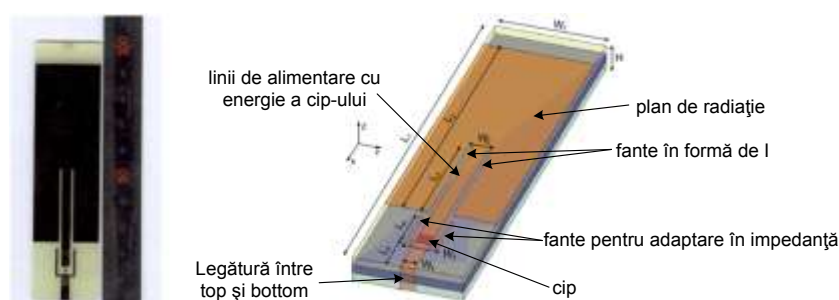


Figura 2.8 Prototip pentru un tag ce folosește antenă microstrip [25]

Pentru a realiza adaptarea de impedanță cu cipul, sunt folosite fantele create special și care pot fi observate în Figura 2.8. Performanțele antenei sunt analizate de către autori folosind programe de simulare specializate. De asemenea, pentru a evidenția performanțele de funcționare în proximitatea mediilor metalice, sunt folosite plane metalice cu diferite dimensiuni, pe care acest tag este atașat. Distanțele de citire obținute, conform [25], sunt prezentate în Tabelul 2-2.

Tabelul 2-2 Distanța maximă de citire măsurată [m]

	Exemplu 1	Exemplu 2	Media
Câmp deschis	5	5,25	5,13
200 mm ²	5,5	6,5	6
400 mm ²	5,5	6	5,75
600 mm ²	4,5	5	4,75

Diminuând efectele mediilor metalice pentru tag-urile sistemelor RFID din domeniul UHF, se poate extinde zona de folosire a acestora, un exemplu fiind industria metalurgică. Astfel, în 2009, un grup de cercetători din cadrul companiei China Steel Corporation, găsesc o modalitate de a soluționa acest aspect prin construirea unui tag pasiv pentru domeniul UHF, acesta fiind prezentat în Figura 2.9 [26]. Distanța maximă de identificare pentru acest tag este controlată de dimensiunile sale și de grosimea creștăturii în formă de Y-Y întâlnită în

mijlocul acestuia. Astfel, dacă valorile pentru parametrii cresc, crește și distanța de identificare. Dimensiunile fizice ale tag-ului sunt adaptate pentru a putea fi utilizat împreună cu un cip oferit de Alien Technology [27], ce are o impedanță de $(22-j124) \Omega$ și o sensibilitate de -14 dBm la o frecvență de 925 MHz (frecvența de operare a sistemelor RFID din domeniul UHF în China). Substratul folosit este sticlotextolit dublu placat (FR4), cu o grosime de 0,75 mm. Dimensiunile optime ale acestui model sunt $L=80$ mm, $W=50$ mm, $H=0,75$ mm, $S_0=32$ mm, $S_1=14$ mm, $S_2=12$ mm, și $p=4$ mm.

Performanțele acestui tag au fost verificate prin folosirea unui cititor RFID ce oferă la ieșire o putere de 2 W EIRP (Effective Isotropic Radiated Power), folosind o antenă polarizată circular cu un câștig de 6 dBi. Distanța maximă de citire obținută a fost de 4,7 m. Distanța obținută pentru acest model de tag poate fi comparată cu distanța unui tag obișnuit, fără a avea în proximitatea lui medii perturbatoare.

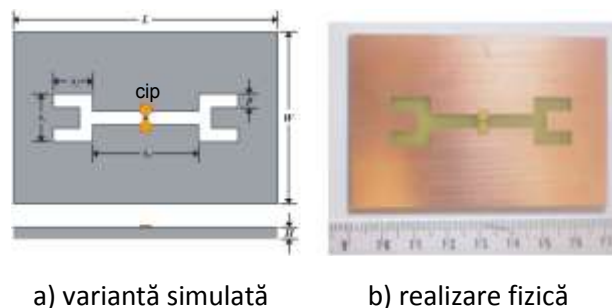


Figura 2.9 Prototip Y-Y al unui tag RFID [26]

Tot în 2009, aceiași cercetători propun un alt model de tag ce funcționează în gama de frecvență UHF [28]. Acest nou model de tag este construit dintr-un plan de cupru ce prezintă o zonă decupată în care este introdusă o mică antenă în formă de buclă (vezi Figura 2.10). Forma de fereastră în care se află antena îi dă și numele tag-ului, nume generic de WinTag. Zona metalică din jurul buclei servește ca element radiant pentru câmpul electromagnetic necesar funcționării tag-ului.

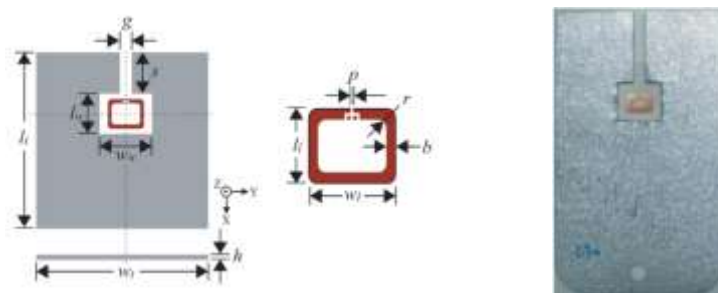


Figura 2.10 Dimensiunile necesare pentru WinTag [28]

Cu toate că realizarea unei antene sub forma unei bucle nu este eficientă pentru un tag în banda de frecvență UHF, acest tip de antenă poate fi folosit pentru a crea un cuplaj inductiv [29, 30]. Specificațiile expuse sunt preluate și evaluate în [28], pentru a crea un model optim de tag care poate funcționa atașat pe obiecte metalice. Dimensiunile fizice, la fel ca în cazul modelului de tag Y-Y dezvoltat de aceeași cercetători, sunt alese în conformitate cu cipul ales pentru tag, pentru a se obține un transfer maxim de putere între antenă și respectivul cip. Așadar în [28], dimensiunile antenei pentru tag sunt alese după specificațiile cipului RFID produs de Texas Instruments [31], ce are o impedanță de $(10,7-j62,8) \Omega$ și o sensibilitate de -12 dBm la o frecvență centrală de 925 MHz. Unul dintre avantajele acestui tag este dat de simplitatea construcției fizice. Se poate folosi ca element radiant al câmpului electromagnetic orice plan metalic având dimensiunile standard necesare pentru modelul de tag.

Tabelul 2-3 Dimensiunile parametrilor WinTag [28]

Parametru	Valoare	Parametru	Valoare
l_t	8	w_l	72
w_t	11	h	0,4
b	2	l_w	16
r	2	w_w	19
p	0,2	g	5
l_l	124	s	30

Pentru testare și evidențiere a performanțelor, autorii au ales pentru implementarea fizică a tag-ului, un plan metalic cu dimensiunile din Tabelul 2-3, în care au creat un decupaj sub forma unei mici ferestre. Pentru ca acest tag să fie ușor de montat pe diferite elemente din metal, cum ar fi țevi din oțel sau role de sârmă, acesta este prevăzut cu un orificiu în partea opusă amplasării antenei, după cum se poate observa și în Figura 2.10.

Datorită diferențelor de frecvență pentru sistemele RFID din domeniul UHF în funcție de regiunea globală (America, Europa, China), companiile ce comercializează sau produc bunuri de consum ce au atașate tag-uri și sunt construite din metal, întâmpină probleme când încheie contracte de comercializare în alte regiuni globale. Pentru aceasta, este nevoie ca tag-urile atașate pe produsele metalice să aibă o gamă de frecvență care să cuprindă toate regiunile globului în conformitate cu standardele RFID (860~960 MHz), adică să lucreze atât în banda de frecvență de 902-928 MHz specifică Americii cât și în banda de frecvență de 865-868 MHz specifică Europei dar și în banda de frecvență de 940-943 MHz specifică Chinei. [28] au ținut cont de aceste reglementări ale frecvenței pe glob și au realizat tag-ul funcțional în toată gama UHF adoptată pentru sistemele RFID din domeniul UHF.

Pentru a verifica performanțele distanței de citire ale WinTag-ului, autorii au folosit un cititor RFID ce funcționează la o frecvență cuprinsă între 902-928 MHz, cu o putere de 4 W EIRP și o antenă polarizată circular având un câștig de 6 dBi. Rezultatele obținute sunt prezentate în Tabelul 2-4.

Tabelul 2-4 Distanța maximă de citire în raport cu orientarea WinTag-ului

Mediu	Distanța maximă de citire [m]
Câmp deschis	5,7
Rolă de sârmă : orientare tag 0^0	5,0
Rolă de sârmă : orientare tag 90^0	3,8
Rolă de sârmă : orientare tag 180^0	2,3
Rolă de sârmă : orientare tag 270^0	4,2

Modelul de tag oferă performanțe bune când este folosit în industrie, pentru companiile ce distribuie produse cum ar fi țevi din oțel, aluminiu, fier, cupru sau role de sârmă, fiind ușor de atașat la acestea. Când însă acest tag este atașat direct de un plan metalic, performanțele acestuia scad foarte mult iar procentul de identificare este nul. Acesta este și principalul dezavantaj al acestui tip de tag.

Tot în 2009, [32] propun un nou model de tag ce oferă performanțe bune atât în aer, cât și atașat de obiecte metalice. Este conceput în așa fel încât atunci când este în aer se comportă ca un tag având ca element de bază o antenă dipol, iar când este atașat de un obiect metalic se comportă ca un tag ce are în componența sa o antenă microstrip (vezi Figura 2.11). Substratul pe care este creat acest tag este format din spumă HDPE (High Density PolyEthylene) ce are o permitivitate relativă egală cu 1,09. Distanța dintre antenă și un eventual plan metalic este de 3,18 mm, iar adaptarea de impedanță folosește o rețea în T (T-match). Valorile pentru dimensiunile acestui model de tag sunt $L=142$ mm, $W=30$ mm, $G=16$ mm, $B=12$ mm, și $t=5$ mm.



Figura 2.11 Model pentru tag RFID [32]

Atunci când tag-ul este atașat de un plan metalic, antena acestuia devine o antenă microstrip iar elementul pentru adaptarea de impedanță T-match se comportă ca o linie de transmisie. Spre deosebire de o antenă clasică ce realizează adaptarea de impedanță folosind

o simplă linie de transmisie, modelul prezentat folosește două structuri simetrice pentru alimentarea cipului cu energie provenită de la antenă.

Deoarece sistemele RFID sunt tot mai des folosite în cadrul rețelelor de distribuție și în depozite, iar structurile de rezistență sau rafturile sunt construite din metal, [33] propun o nouă soluție de diminuare a efectelor produse de mediile metalice asupra sistemelor RFID din domeniul UHF, prin construirea unui tag ce poate fi atașat de un container metalic.

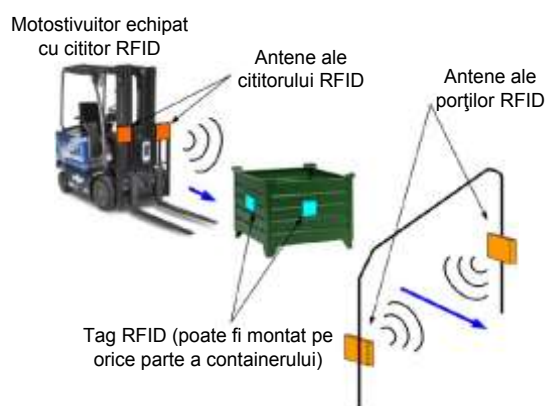


Figura 2.12 Scenariu pentru folosirea unui container metalic prevăzut cu tag RFID [33]

Scenariul propus de aceștia are la bază un container ce trebuie citit atât de motostivuitorul care ridică acel container cât și de poarta prin care trece pentru a fi depozitat (vezi Figura 2.12).

Atunci când sunt întâlnite astfel de situații, tag-ul atașat de container trebuie citit aproape din orice direcție. Structura acestui tag (vezi Figura 2.13) este deja implementată și este utilizată pe piață, în industria auto, poștă sau chiar logistică.

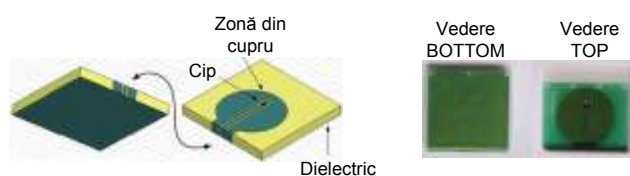


Figura 2.13 Structură tag RFID omnidirecțional [33]

Testările pentru performanța acestui tag au fost realizate în camera anecoidă, având tag-ul montat pe un plan metalic, cu dimensiunile de 30 cm^2 și folosind un cititor RFID cu o putere de 4 W EIRP , echipat cu o antenă polarizată circular. Din datele experimentale preluate de către autori în [33], performanțele acestui model de tag sunt ridicate, putându-se realiza citirea din diferite poziții și indicând o distanță de citire relativ mare, aproximativ 7 m pentru direcție normală și până la 4 m din lateral.

Mai recent, la începutul anului 2011, [34] analizând aspectele problematice ale mediilor metalice aflate în proximitatea sistemelor RFID și urmărind indicațiile expuse în [32], încearcă să își expună propriile idei pentru realizarea unui tag în banda de frecvență UHF care să aibă aplicabilitate pentru suprafețe metalice. Noua idee privește principalul aspect legat de performanța sistemelor RFID, și anume distanța la care pot fi identificate tag-urile. Acest aspect este luat comparativ cu tag-urile existente în comerț capabile să funcționeze în proximitatea mediilor metalice, însă la un preț de producție mult mai mic.

Metoda propusă în [34] privește utilizarea unui tag obișnuit al cărui cost estimat este de aproape 5 cenți și folosirea unui substrat de material absorbant între respectivul tag și planul metalic, substrat alcătuit din polistiren extrudat tip 103,7. Permitivitatea relativă a acestui material absorbant este de 1,03, fapt ce conduce la propagarea câmpului electromagnetic doar la suprafața superioară a tag-ului. Structura acestui prototip de tag poate fi observată în Figura 2.14. Comparăția modelului creat este făcută cu tag-urile comerciale special construite pentru aplicarea pe suprafețe metalice, tag-uri a cărui cost variază între 5 \$ și 10 \$.

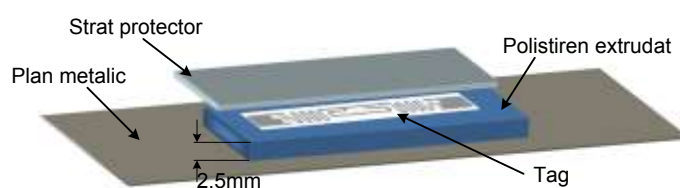


Figura 2.14 Prototip de tag UHF ce folosește material absorbant [34]

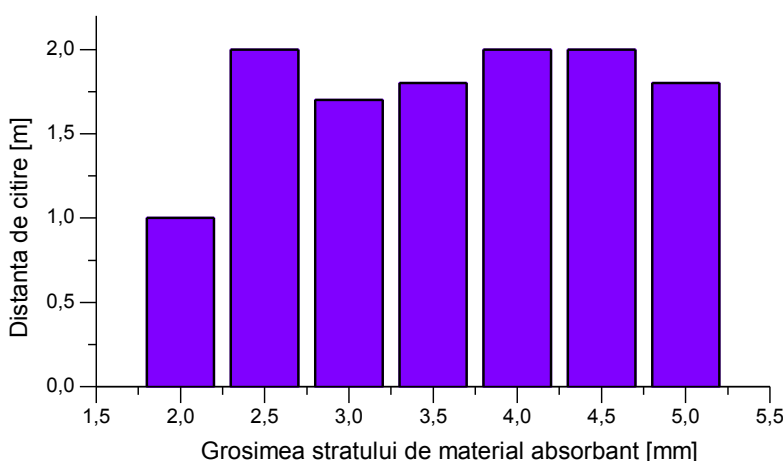


Figura 2.15 Testarea experimentală a grosimii de material absorbant [34]

Grosimea substratului de material absorbant este aleasă experimental, prin testarea grosimilor cuprinse între 1–5 mm (vezi Figura 2.15).

Pentru a evidenția performanțele modelului de tag, numit de către autori *ALR'M foam*, acesta este atașat de transformatoare industriale, fiind orientat la un unghi de 0° , respectiv 90° .

Distanța de citire obținută comparativ cu cea a tag-urilor comerciale specializate pentru medii metalice, este prezentată în Tabelul 2-5. Această distanță este obținută prin teste efectuate folosind mai multe tipuri de cititoare RFID, respectiv antene polarizate circular sau liniar.

Tabelul 2-5 Distanța de citire a tag-ului ALR'M foam [m]

Tip tag	Cititor Unghi	ALR9800		Mercury4	LS	AWID	Hanmeg ENG	SAMSYS
		Antenă circulară	Antenă liniară					
Sontec	90	2,1	2,5	4,9	3,6	2	1,6	2,8
	0	2,3	2,6	6,3	3,7	2,8	2,1	3,8
Prenix	90	3,1	3,4	7,4	4,9	1,3	1,7	4,8
	0	3,3	3,7	8	5,1	1,8	3,4	5,4
Smart1	90	2,7	3,3	7,5	4,8	1,1	2,4	5,1
	0	3,0	3,4	8	5,0	1,0	3,9	6
AWID	90	2,8	3,2	5,6	4,1	1,7	3,8	5,1
	0	3,1	3,4	6,9	4,3	2,7	4,1	6,2
ALR'M foam	90	2,0	2,2	3,8	2,0	1,3	2,0	2,1
	0	2,2	2,3	4,8	2,1	1,0	2,2	2,2

Din Tabelul 2-5 rezultă că modelul creat oferă distanțe de citire comparabile cu celelalte tag-uri construite special pentru a funcționa în proximitatea mediilor metalice.

În ceea ce privește structura flexibilă a tag-urilor RFID, în domeniul UHF acest aspect este abordat începând cu anul 2012.

În [13], autorii propun un model de antenă flexibilă ce poate fi folosită cu succes în implementarea tag-urilor RFID ce funcționează în medii neprielnice. Structura acestei antene este relativ simplă, folosind ca și suport flexibil pentru realizarea acesteia silicon, cu grosimea de 1mm. Dimensiunea fizică a acestui tag este de 64mm X 29mm X 4mm. Structura simulată, precum și implementarea fizică se poate observa în Figura 2.16.

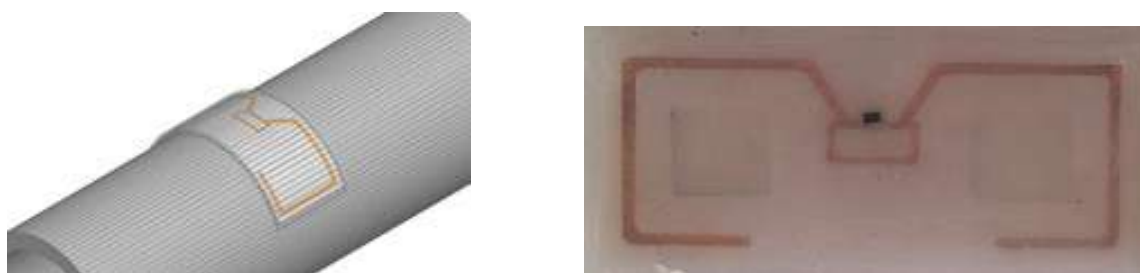


Figura 2.16 Structură tag RFID flexibil [13]

Distanța de citire oferită de astfel de antenă folosind ca și substrat materialul siliconic este aproximativ 3m în banda de frecvență europeană ETSI (865MHz-868MHz).

O altă abordare este realizată și în lucrarea științifică [14] care prezintă un model flexibil de tag RFID folosit în domeniul UHF. De data aceasta antena este de tip „patch”, folosind ca material suport pentru antenă PVC, a cărei permitivitate relativă este 2,62. Dimensiunile fizice ale acestei antene sunt relativ mari (106mm X 46mm X 1,8mm).



Figura 2.17 Antenă flexibilă tip „patch” [14]

Câștigul obținut este de -2.7dBi, însă cu toate acestea, distanța maximă de operare este de aproximativ 10m, distanță măsurată folosind un cititor RFID cu antenă polarizată liniar.

În [35], autorii folosesc drept substrat BaTiO₃ (sau material ceramic flexibil) pentru construirea antenei folosite de un tag RFID din domeniul UHF. Este de remarcă aici că dimensiunile fizice ale antenei sunt relativ mici (28mm X 13mm X 1,5mm), iar performanța obținută este ridicată, obținându-se o distanță de citire de aproximativ 3m.



Figura 2.18 Antenă RFID flexibilă cu substrat din material ceramic [35]

În privința influenței diverselor materiale asupra antenei unui cititor RFID ce funcționează în domeniul UHF, se pot remarca o serie de studii, prin care se demonstrează că aceste antene sunt foarte puțin afectate de astfel de medii. În banda de frecvență UHF, antenele prezintă prin diagrama lor de radiație o formă directivă, având un lob principal și alți lobi secundari sau lobi laterali mult mai mici (vezi Figura 2.19). Acest fapt conduce la

implementarea antenelor pentru cititoarele sistemelor RFID fără a ține prea mult cont de influența mediilor metalice din jurul acestora [36].

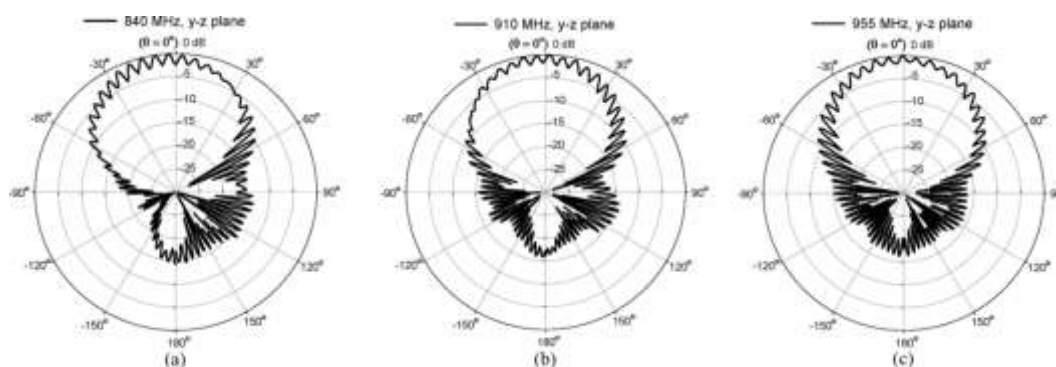
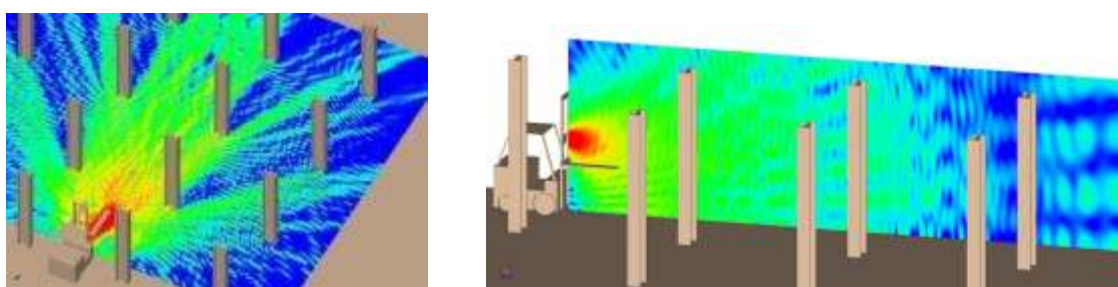


Figura 2.19 Reprezentarea directivității unei antene în domeniul UHF [37]

O analiză privind acest aspect a fost realizată de către cei de la FEKO folosind programe de simulare specializate.



a) raza de vizualizare de 20 dB

b) raza de vizualizare de 30 dB

Figura 2.20 Simulări ale câmpului electromagnetic pentru o antenă UHF-RFID [38]

Aceștia încearcă să arate cum se comportă o antenă de cititor RFID în cadrul unui depozit, unde structurile acestuia sunt realizate din metal, iar antena cititorului este atașată de un motostivuitor, care are de asemenea o structură metalică.

Modelul astfel creat arată directivitatea antenei cititorului RFID montată pe un motostivuitor (vezi Figura 2.20). Din analiza acestui model creat și datorită distanțelor mari de operare a sistemelor ce folosesc tehnologia RFID, rezultă că utilizarea antenelor pentru cititor cu o construcție specială pentru mediile metalice este inefficientă. Astfel, se pot obține performanțe foarte bune pentru sistemele RFID din domeniul UHF care funcționează în proximitatea mediilor metalice, când sunt folosite pentru cititor antene RFID obișnuite.

3. Concluzii

În urma studiului literaturii de specialitate din acest domeniu, se poate spune că funcționarea tag-ului RFID din domeniul HF în proximitatea mediilor metalice este posibilă prin folosirea materialelor absorbante între acestea și mediul perturbator. Aceste materiale se comportă ca o barieră, iar câmpul magnetic este ghidat către cip, pentru a-l alimenta, făcând astfel posibilă comunicația între tag și cititor.

În ceea ce privește antena cititorului, soluția cea mai des întâlnită presupune implementarea unui model „static” de antenă ce are în componența sa un plan metalic aflat la o anumită distanță. Acest plan metalic va oferi un fel de imunitate a antenei la eventualele medii metalice care vor fi în proximitatea acesteia. Un dezavantaj major al acestei structuri de antenă, este dat de unghiul la care pot fi orientate tag-urile pentru a fi identificate. Câmpul magnetic din centrul antenei va fi atenuat datorită apariției curenților eddy în planul metalic din structura fizică a acestui tip de antenă. Astfel, procentul de identificare va scădea dinspre extremitățile antenei către centru, iar în cazul în care tag-ul este orientat perpendicular cu antena, acest procent de identificare va fi aproape nul în centrul respectivei antene. Un alt dezavantaj este dat de modul în care este calibrată această antenă. Dacă structura planului metalic din componența antenei suferă modificări, sau apar alte medii metalice în proximitate, antena se decalibrează, iar procentul de identificare a tag-urilor va scădea. O eventuală calibrare a antenei presupune utilizarea echipamentelor speciale în acest sens, cum ar fi analizorul vectorial iar procesul de calibrare trebuie realizat de către un operator uman.

Pentru sistemele RFID din domeniul UHF, antena cititorului nu necesită modificări pentru a putea funcționa la performanțe maxime în proximitatea mediilor metalice. Singura componentă a sistemului RFID în acest domeniu de frecvență ce necesită o atenție sporită este tag-ul. Deoarece lungimea de undă la această frecvență are valoare mică, antena tag-ului este foarte sensibilă la schimbări ale mediului înconjurător. Pentru a preveni aceste aspecte, trebuie implementate modele noi de antene care să ofere o sensibilitate scăzută la eventualele schimbări întâlnite în mediul înconjurător. Astfel de antene, conform literaturii de specialitate din acest domeniu, sunt antenele microstrip. Performanțele acestora pot fi comparate cu performanțele antenelor pentru tag-urile obișnuite.

Atât în domeniul de înaltă frecvență, cât și în cel de foarte înaltă frecvență, identificarea obiectelor metalice cu forme geometrice diverse (cilindrice, conice, sferice) este încă greu de realizat. În acest sens, trebuie ca tag-ul care este atașat de respectivul obiect să ia forma obiectului, să fie flexibil, iar procesul de identificare să fie realizat cu succes, chiar

dacă obiectul ce trebuie identificat este metalic. Soluțiile existente până în prezent implică folosirea unei antene pentru tag-uri, contruite pe un material flexibil. Cu toate acestea, dimensiunile realizate sunt mari de la 6cm până la peste 10cm, ceea ce face ca doar o anumită categorie de obiecte să poată fi identificate cu succes.

Bibliografie

- [1] A. M. Gaitan, V. Popa, V. G. Gaitan, A. I. Petrariu, and I. Ungurean, "Products Authentication and Traceability Using RFID Technology and OPC UA Servers," *Elektronika ir Elektrotechnika Journal*, vol. 18, pp. 73-76, 2012.
- [2] P. A. Bottomley and E. R. Andrew, "RF magnetic field penetration, phase shift and power dissipation in biological tissue: implications for NMR imaging," *Phys Med Biol*, vol. 23, pp. 630-643, Jul 1978.
- [3] K. D'Hoe, A. Van Nieuwenhuyse, G. Ottoy, L. De Strycker, L. De Backer, J. P. Goemaere, and B. Nauwelaers, "Influence of Different Types of Metal Plates on a High Frequency RFID Loop Antenna: Study and Design," *Advances in Electrical and Computer Engineering*, vol. 9, pp. 3-8, 2009.
- [4] M. Qing and N. Z. Chen, "Proximity Effects of Metallic Environments on High Frequency RFID Reader Antenna: Study and Applications," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 55, pp. 3105-3111, 2007.
- [5] M. Rata, G. Rata, A. Graur, and V. Popa, "The influence of different materials in 13.56 RFID system," in *2007 1st Annual Conference RFID Eurasia*, 2007, pp. 1-3.
- [6] I. Finis, V. Popa, A. Lavric, A. I. Petrariu, and C. Males, "An Analytical Determination of the Reading Volume for an HF RFID Antenn," in *2012 2nd Baltic Congress on Future Internet Communications (BCFIC)*, 2012, pp. 170-173.
- [7] D. Dos Reis, M. Lambert, and D. Lesselier, "Eddy-current evaluation of threedimensional defects in a metal plate," *Inverse Problems*, vol. 18, pp. 1857-1871, 2002.
- [8] H. Fujita and K. Ishibashi, "Eddy Current Analysis of a Thin Metal Plate by Line Integral Equations," in *12th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, 2006, pp. 190-190.
- [9] S. Bovelli, F. Neubauer, and C. Heller, "A Novel Antenna Design for Passive RFID Transponders on Metal Surfaces," in *36th European Microwave Conference*, 2006, pp. 580-582.
- [10] A. I. Petrariu, V. G. Gaitan, V. Popa, A. M. Gaitan, and I. Finis, "Evaluation of Balanced Capacitance Matching Unit for HF RFID Systems in Metallic Environments," *Elektronika ir Elektrotechnika Journal*, vol. 18, pp. 39-42, 2012.

- [11] H. Zhu, S. Lai, and H. Dai, "Solutions of Metal Surface Effect for HF RFID Systems," in *2007 International Conference on Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2007, pp. 2089-2092.
- [12] K. Arora, H. Mallinson, A. Kulkarni, J. Brusey, and D. McFarlane, "The Practical Feasibility of Using RFID in a Metal Environment," in *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, 2007, pp. 1681-1685.
- [13] J. Alarcon, R. Saba, M. Egels, and P. Pannier, "A Flexible UHF RFID Tag for Harsh Environments," in *IEEE 2012 International Conference on RFID - Technologies and Applications (RFID-TA)*, 2012, pp. 267-270.
- [14] H.-W. Son, H.-G. Jeon, and J.-H. Cho, "Flexible wideband UHF RFID tag antenna for curved metal surfaces " *Electronics Letters* vol. 48, pp. 749-750 2012.
- [15] L. Hoseon, K. Sangkil, d. D. Danilo, and M. T. Manos, "A novel "Universal" inkjet-printed EBG-backed flexible RFID for rugged on-body and metal mounted applications," in *2012 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT)*, 2012, pp. 1-3.
- [16] S. Bovelli, C. Heller, and F. Neubauer, "Mount-on-Metal RFID Transponders for Automatic Identification of Containers," in *36th European Microwave Conference*, 2006, pp. 726-728.
- [17] M. T. Thomson, "Inductance Calculation Techniques," *Power Control and Intelligent Motion*, pp. 1-11, 1999.
- [18] Texas-Instruments, "HF Antenna Design Notes," Texas Instruments, Technical Application Report 11-08-26-003, 2003.
- [19] X. Qing and Z. N. Chen, "Characteristics of a Metal-Backed Loop Antenna and its Application to a High-Frequency RFID Smart Shelf," *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 51, pp. 26-38, 2009.
- [20] P. Raunonen, L. Sydänheimo, L. Ukkonen, M. Keskilammi, and M. Kivikoski, "Folded dipole antenna near metal plate," *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*, vol. 1, pp. 848-851, 2003.
- [21] L. Ukkonen, M. Soini, D. Engels, L. Sydänheimo, and K. M., "Effect of conductive material in objects on identification with passive RFID technology: a case study of cigarette cartons," in *5th International Conference on Machine Automation*, 2004, pp. 569-572.

- [22] L. Ukkonen, L. Sydanheimo, and M. Kivikoski, "Effects of Metallic Plate Size on the Performance of Microstrip Patch-Type Tag Antennas for Passive RFID," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 4, pp. 410-413, 2005.
- [23] G. Kumar and K. P. Ray, *Broadband Microstrip Antennas*. Norwood: Artech House Inc., 2003.
- [24] S. Lee, Y. C. Chung, S. Kim, and C. Lee, "RFID Tag Antenna for Metallic Objects," in *2005 International Conference on Computer Communication Systems*, 2005, pp. 267-270.
- [25] Y. Um, U. Kim, W. Seong, and J. Choi, "A Novel Antenna Design for UHF RFID Tag on Metallic Objects," in *PIERS Proceedings*, 2007, pp. 158-161.
- [26] S.-L. Chen and K.-H. Lin, "A Y-Y-shaped Slot Antenna Design for an RFID Tag Designed for Metallic Tag Applications," in *Progress In Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, 2009, pp. 427-430.
- [27] Alien-Technology, "Higgs™-3: EPC Class 1 Gen 2 RFID Tag IC," Alien Technology, Datasheet2010.
- [28] S.-L. Chen, S.-K. Kuo, and C.-T. Lin, "A Metallic RFID Tag Design for Steel-Bar and Wire-Rod Management Application in the Steel Industry," *Progress In Electromagnetics Research*, vol. 91, pp. 195-212, 2009.
- [29] J. Ahn, H. Jang, H. Moon, J. W. Lee, and B. Lee, "Inductively coupled compact RFID tag antenna at 910 MHz with nearisotropic radar cross-section (RCS) pattern," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 6, pp. 518-520, 2007.
- [30] H.-W. Son and C.-S. Pyo, "Design of RFID tag antennas using an inductively coupled feed," *IEEE Electronics Letters*, vol. 41, pp. 994-995, 2005.
- [31] Texas-Instruments, "TI UHF Gen2 IC Antenna Design," Texas Instruments, Reference Guide SCBU015, 2006.
- [32] N. A. Mohammed, M. Sivakumar, and D. D. Deavours, "An RFID tag capable of free-space and on-metal operation," in *2009 IEEE Radio and Wireless Symposium*, 2009, pp. 63-66.
- [33] K. Rao, S. F. Lam, and P. V. Nikitin, "UHF RFID tag for metal containers," in *2010 Asia-Pacific IEEE Microwave Conference Proceedings*, 2010, pp. 179-182.
- [34] C. R. Park and K. H. Eom, "RFID Label Tag Design for Metallic Surface Environments," *Sensors*, vol. 11, pp. 938-948, 2011.
- [35] A. A. Babar, T. Bjorninen, V. A. Bhagavati, L. Sydanheimo, P. Kallio, and L. Ukkonen, "Small and Flexible Metal Mountable Passive UHF RFID Tag on High-

- Dielectric Polymer-Ceramic Composite Substrate," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 1319-1322 2012.
- [36] J. Kraus and R. J. Marhefka, *Antennas for all Applications*, Third ed.: McGraw-Hill, 2002.
- [37] Z. N. Chen, "A Universal UHF RFID Reader Antenna," *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 57, pp. 1275-1282, 2009.
- [38] FEKO, "Electromagnetic Modelling of UHF RFID Systems," White Paper 2010.