

Tecnologia d'antenes per a terminals mòbils

Jaume Anguera Pros
Aurora Andújar Linares

PID_00175722



Els textos i imatges publicats en aquesta obra estan subjectes –llevat que s'indiqui el contrari– a una llicència de Reconeixement-NoComercial-SenseObraDerivada (BY-NC-ND) v.3.0 Espanya de Creative Commons. Podeu copiar-los, distribuir-los i transmetre'ls públicament sempre que en citeu l'autor i la font (FUOC. Fundació per a la Universitat Oberta de Catalunya), no en feu un ús comercial i no en feu obra derivada. La llicència completa es pot consultar a <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/es/legalcode.ca>

Índex

Introducció	5
Objectius	7
1. Evolució dels telèfons mòbils	9
1.1. Generacions mòbils sense fils	9
1.2. Augment en el nombre de bandes de freqüència	10
1.3. Influència del disseny industrial en antenes	11
1.4. Requisits i controls	11
1.5. Reptes de disseny de l'antena en els telèfons intel·ligents	15
2. Caracterització d'antenes per a terminals mòbils	18
2.1. Paràmetre de qualitat per a terminals mòbils	18
2.1.1. Paràmetres d'antena passius	19
2.1.2. Paràmetres d'antena actius	22
2.2. Mètodes de mesures d'antenes per a terminals mòbils	23
3. Tecnologia d'antenes per a terminals mòbils	27
3.1. Antenes de recepció: FM	27
3.1.1. Elements no ressonants	28
3.1.2. Reutilització de l'antena de telefonia mòbil	30
3.2. <i>Short range wireless</i>	33
3.3. Antenes per a comunicacions mòbils	35
3.3.1. Radiadors	36
3.3.2. Arquitectures robustes a l'efecte de la mà	40
3.3.3. Xarxes d'adaptació	44
3.3.4. Intel·ligència en el pla de massa	46
3.3.5. Tecnologia basada en excitació del pla de massa	51
Resum	56
Bibliografia	57

Introducció

La comunicació entre dos punts distants ha estat un repte constant per a la humanitat, des dels senyals de fum, passant pel telègraf, fins a la comunicació sense fil per mitjà de senyals electromagnètics. Aquesta evolució representa un esforç constant per a millorar la qualitat i l'eficàcia de la comunicació a distància amb l'evolució constant de tècniques que millorin el lliurament de continguts, des de la veu fins a les dades. Els terminals mòbils són el paradigma més representatiu d'aquests esforços. En aquest sentit, la comunitat d'antenes té un paper molt important centrat en el disseny d'antenes de baix perfil, miniatura i multibanda, juntament amb els sistemes de múltiples antenes, capaços de satisfer les exigències estrictes dels terminals mòbils multifunció sense fils. A més a més, la complexitat del disseny d'antenes augmenta d'una manera continuada, no solament per la pressió de les necessitats del mercat sinó també per les normes de seguretat que requereixen antenes eficients capaces de radiar tanta energia com sigui possible en condicions d'espai lliure, de manera que la potència radiada cap al cos humà sigui mínima.

El modelatge d'antenes per a terminals mòbils utilitzant programari de simulació electromagnètica ha millorat d'una manera significativa, ja que permet la simulació del comportament d'antenes en entorns complexos. En aquest sentit, el programari electromagnètic possibilita la simulació d'antenes no solament pel que fa a la presència humana (com el cap humà i la mà), sinó també considerant la presència de components propers, com càmeres, bateries, pantalles i altaveus (els mètodes numèrics utilitzats en simulació electromagnètica s'analitzen en el mòdul "Mètodes numèrics per a la resolució de les equacions de Maxwell").

En el mateix sentit, els avenços recents en els sistemes de mesura i les metodologies han esdevingut temes d'actualitat en la comunitat de mesures d'antena, especialment amb nous sistemes de múltiples antenes MIMO (*multiple input multiple output*).

Finalment, l'èxit comercial dels terminals mòbils implica l'ús de tècniques de fabricació adequades. Això no solament és rellevant per a reduir el cost de producció en massa sinó també per a millorar el rendiment del disseny d'una manera controlada.

El present mòdul es divideix en els apartats següents:

- En l'apartat 1 del mòdul es descriu l'evolució dels telèfons mòbils, l'aparició de noves bandes de freqüència, la influència del disseny indus-

trial en les antenes, els requisits i reglaments, a més dels desafiaments de disseny d'antena en els telèfons intel·ligents (*smartphones*).

- L'apartat 2 explica els paràmetres electromagnètics més rellevants per a caracteritzar antenes per a terminals mòbils, com l'eficiència de radiació, la impedància d'antena, la correlació, el guany de diversitat, la capacitat MIMO, la potència radiada total (*TRP, total radiation power*), la taxa d'absorció específica (*SAR, specific absorption rate*), la sensibilitat isòtropa total (*TIS, total radiation sensitivity*) o la sensibilitat mitjana *fading* (*AFS, average fading sensitivity*) i el rendiment de la taxa de dades (*TPUT, data bit throughput*). A més a més, l'apartat 2 mostra que aquests paràmetres es poden mesurar en una cambra de reverberació.
- L'apartat 3 resumeix els últims avenços en el camp d'antenes per a terminals mòbils. En concret, descriu la tecnologia d'antenes per al disseny d'antenes de recepció de freqüència modulada (FM), per a aplicacions sense fils de curt abast, i finalment per a comunicacions mòbils. En aquest últim apartat s'expliquen diverses tècniques de disseny d'antena, com els monopols acoblats i PIFA (*planar inverted F-antenna*) combinats amb ranures. També es presenta una tècnica robusta per a l'efecte de la interacció humana basat en una agrupació (*array*) de monopols petits. L'apartat 3 descriu a més l'ús de xarxes de banda ampla que s'utilitzen per a millorar l'amplada de banda d'un element d'antena amb la finalitat d'augmentar el nombre de bandes de funcionament. També se centra en les tècniques per a agregar intel·ligència en el pla de massa i millorar l'amplada de banda i l'eficiència. Finalment, es descriu una tecnologia d'antena innovadora, basada en elements excitadors de modes en el pla de massa. Aquesta tecnologia elimina la necessitat d'incloure elements d'antena de dimensions al voltant del quart de longitud d'ona, cosa que permet la integració de múltiples elements d'antena i múltiples funcionalitats i serveis en la plataforma sense fil.

Objectius

Amb l'estudi d'aquest mòdul didàctic, assolireu els objectius següents:

1. Tenir una visió general de l'estat de l'art en el disseny d'antenes per a terminals mòbils.
2. Entendre els desafiaments que existeixen en aquest camp.
3. Conèixer les prestacions dels sistemes de mesura per a terminals mòbils com les cambres anecoiques, reverberants, i la SAR.
4. Conèixer les regulacions SAR i HAC (*hearing aid compatibility*).
5. Conèixer la utilitat de *phantoms* de cap i de mà.
6. Entendre els paràmetres passius i actius utilitzats per a caracteritzar antenes de terminals mòbils.
7. Enllaçar els conceptes de teoria d'antenes amb aplicacions per al disseny d'antenes miniatura i multibanda per a terminals mòbils.

1. Evolució dels telèfons mòbils

L'evolució dels telèfons mòbils al llarg de la història ha estat impressionant. La primera trucada telefònica mitjançant un telèfon mòbil es remunta a la dècada dels setanta. Des de la dècada dels vuitanta, els telèfons mòbils han esdevingut un bé per a tothom i el mercat de la telefonia mòbil no ha deixat d'expandir-se des d'aleshores.

L'augment exponencial en el nombre de subscriptors impulsa la recerca i el desenvolupament en la comunicació sense fil per a oferir tecnologies capaces d'acomodar aquest creixement. Aquestes tecnologies han evolucionat d'una manera considerable i han inclòs des del pas d'analògic a digital, o des de la utilització d'una banda de freqüència a diverses bandes de freqüència. Aquesta evolució constant ha portat al desplegament recent del sistema d'última generació en el mercat de consum: *long term evolution* (LTE).

Els operadors de terminals mòbils han començat a implementar la tecnologia LTE sense fil per als telèfons intel·ligents de pròxima generació. Abans de conèixer els desafiaments que han d'afrontar els enginyers en el desenvolupament d'antenes per a telèfons habilitats per a LTE, és important tenir en compte les generacions anteriors de terminals mòbils per a descriure els reptes generals de disseny de l'antena, alguns dels quals encara romanen entre els desafiaments actuals de disseny. En els subapartats següents es comenten els desafiaments que existeixen en el disseny d'antenes per a telèfons mòbils.

1.1. Generacions mòbils sense fils

La primera generació (1G) de tecnologia de comunicació sense fil es va introduir en els anys vuitanta del segle xx. Els estàndards utilitzats comercialment 1G, incloent-hi l'NMT (*nordic mobile telephone*) i l'AMPS (*advanced mobile phone system*), van ser analògics. La primera xarxa NMT utilitzava una banda de freqüència en la regió de 450 MHz, anomenat NMT-450. A causa de la demanda dels abonats, se'n va expandir la xarxa a la regió de 900 MHz (NMT-900), ja que permetia la introducció de més canals. L'estàndard AMPS utilitzat als Estats Units d'Amèrica va ser desplegat en la regió de freqüències de 800 MHz.

Els sistemes ràdio de les següents generacions, per exemple, 2G, es van iniciar en la dècada dels noranta. Aquestes noves generacions van ser dràsticament diferents a causa de la integració d'estàndards digitals. Són molts els avantatges dels estàndards digitals envers els estàndards analògics, però el principal és que els digitals donen cabuda a un major nombre d'usuaris, cosa que era necessària atès l'augment del nombre d'aquests.

Lectura complementària

En l'article següent podeu trobar alguns detalls sobre la primera trucada telefònica amb un telèfon mòbil:

S. Miller (2009). "Motorola Executive Helped spur Cellphone Revolution". *Wall Street Journal* (20-21 de juny, pàg. A10). Accessible en línia.

Malgrat que els sistemes 2G, com GSM, D-AMPS i CDMAOne, han estat reemplaçats per les seves generacions més recents, encara romanen xarxes àmpliament utilitzades arreu del món. La tercera generació (3G) apareix en el mercat al principi de la primera dècada del segle XXI i la recent xarxa LTE es desplega al principi del 2010. Aquests sistemes van ser adaptats posteriorment per a millorar els serveis de dades. En els apartats següents es descriuen els factors que influeixen en el disseny de l'antena i els desafiaments que han d'afrontar els enginyers d'antenes en el desenvolupament de terminals mòbils.

1.2. Augment en el nombre de bandes de freqüència

Els estàndards de comunicació sense fils porten associat un conjunt de bandes de freqüència. Afortunadament, algunes bandes de les noves generacions se superposen a les generacions anteriors, cosa que allibera una part de la càrrega en el disseny de l'antena quan apareix una nova generació. A partir de la primera generació i fins a la generació actual, el nombre de bandes de freqüència ha anat augmentant. Les antenes dels terminals mòbils de primera generació dissenyades en els anys vuitanta del segle passat estaven pensades per treballar en una única banda de freqüència (antenes monobanda).

Com que el nombre de bandes de freqüència va augmentar amb les noves generacions, van esdevenir indispensables dissenys d'antena multibanda. A més a més, l'augment de la popularitat de la telefonia mòbil i la necessitat de garantir el servei telefònic en altres països va provocar l'aparició de terminals mòbils amb capacitat d'itinerància. Això era necessari perquè els abonats de la regió de mercat poguessin utilitzar el mateix dispositiu en altres regions amb estàndards similars, però amb bandes de freqüència d'operació diferents. Per exemple, als Estats Units d'Amèrica un telèfon operatiu a l'Amèrica del Nord té les bandes principals d'operació de 824 MHz a 894 MHz i de 1.850 MHz a 1.990 MHz tant per a GSM (2G) com per a UMTS (3G).

A més a més, apareixen bandes addicionals per als nous estàndards d'LTE que se situen en la banda de 700 MHz. El telèfon generalment tindria capacitat d'itinerància en bandes d'operació utilitzades en la resta del món, com per exemple GSM 900, GSM 1800, UMTS i BI VIII B. Les bandes de freqüències de cobertura d'aquestes bandes itinerants són de 880 MHz a 960 MHz (GSM i UMTS 900 B VIII), 1.710 MHz a 1.880 MHz (GSM 1800), i 1.920 MHz a 2.170 MHz. Per tant, hi ha una necessitat de dissenyar antenes multibanda capaces de funcionar en aquestes bandes amb un bon rendiment.

1.3. Influència del disseny industrial en antenes

Per a algunes persones, un dispositiu mòbil sense fil és un dispositiu que només serveix com un mitjà de comunicació i no els importa si és gran o petit, prim o gruix, brillant o mat. Per a altres persones, el disseny industrial és un factor important quan s'aplica als terminals mòbils. L'aspecte i la sensació dels seus telèfons són factors importants a l'hora de prendre la decisió de compra.

Al final del segle XX, les antenes dels telèfons mòbils van ser dissenyades externament (antenes externes). Gairebé totes eren de tipus monopòl, retràctil o no, o helicoidals, que sobresortien de la part superior dels telèfons (figura 1). El disseny industrial no va tenir gaire influència ni va imposar limitacions importants a l'hora de dissenyar l'antena. En la primera dècada del segle XXI, el disseny de l'antena per a telèfons mòbils canvia completament el seu curs i evoluciona cap al disseny interior (antenes internes), que resultava molt atractiu en termes de disseny industrial. No obstant això, el disseny de nous reptes va començar a sovintejar en els enginyers de moltes disciplines, incloent-hi la radiofreqüència (RF), l'àudio i, per descomptat, els enginyers d'antena. Com es podia esperar, la integració d'antenes dins del telèfon va crear problemes d'interferència i soroll que havien de ser controlats. A més a més, el disseny de l'antena es limitava aleshores a l'interior del telèfon, cosa que aportava nous desafiaments. No obstant això, aquests desafiaments s'han superat amb l'ajuda de les noves tecnologies i de la ment creativa dels enginyers d'antenes.

Figura 1. Exemples de telèfons mòbils al llarg de totes les generacions



1.4. Requisits i controls

Els requisits són una part important en el disseny dels telèfons mòbils. Els operadors depenen d'un conjunt d'especificacions per assegurar-se que els telèfons que venen funcionaran correctament. Al seu torn els fabricants de telèfons s'han d'assegurar que compleixen els requisits de l'operador.

Fins als estàndards sense fils de tercera generació, el rendiment de l'antena s'avaluava mitjançant dues magnituds: *TRP* (*total radiated power*) i *TIS* (*total isotropic sensitivity*). *TRP* és una mesura de la quantitat d'energia que es radia

per l'antena quan està connectada a un transmissor. *TIS* es defineix com la mesura de la menor potència que es pot rebre en el receptor perquè aquest encara pugui mantenir un enllaç de comunicació fiable. Per exemple, la confiança de l'enllaç de comunicacions de la norma GSM es defineix mitjançant una relació de bits erronis (*BER*) en un nivell de 2,4%.

Els requisits de l'operador han evolucionat al llarg dels anys. Hi ha diverses raons per les quals es va produir aquesta evolució. En darrer terme, els operadors, i els fabricants de telèfons, saben que els telèfons necessiten comportar-se correctament amb la condició d'entorn real de l'usuari que manté el telèfon contra el cap i el subjecta amb la mà. No obstant això, no és possible que els operadors es basin en la mesura del rendiment de fabricants de telèfons utilitzant un cap humà i la subjecció amb la mà d'una persona real, ja que el cap de cada persona i la forma de subjecció són diferents d'un individu a un altre. Calia un grup d'experts per a investigar la manera d'assolir un model estandarditzat d'un cap i una mà humans.

Una d'aquestes organitzacions és la CTIA (The Wireless Association –accessible en línia). Un subgrup d'aquesta organització va ser creat per arribar al disseny d'un conjunt estandarditzat de cap i de mà amb la finalitat d'obtenir la mesura d'execució consistent i fiable en un entorn de laboratori controlat. Mentre aquest treball estava en estudi, els operadors van haver de confiar en mesures de *TRP* i *TIS* en condicions d'espai lliure.

El model del cap *phantom*, anomenat *SAM* (*specific anthropomorphic mannequin*, 'maniquí antropomòrfic específic'), va ser presentat per primera vegada el 2002 (figura 2). El material dins la carcassa de plàstic té unes propietats elèctriques específiques, és a dir, una constant dielèctrica i una conductivitat semblants a les d'un cap humà real. El modelatge de la mà era més difícil i va trigar més a arribar a l'última sèrie de mans *phantom* (figura 3).



Figura 2. Model de cap humà SAM

Figura 3. Exemples de *phantom* de mà



Els operadors de tot el món tenien diferents requisits i quan es va decidir adoptar les noves condicions de mesura de les seves necessitats no va ser alhora. Els dissenyadors d'antenes es van haver d'enfrontar al repte de dissenyar an-

tenes amb una execució que va haver de complir requisits de diferents operadors amb condicions ambientals diverses. En certs dissenys de telèfons en què l'antena és externa o quan hi ha un volum suficient d'antena per al disseny de l'antena interna, en general no hi ha cap problema per a satisfer els requisits de tots els operadors, però no és el cas dels terminals mòbils actuals com els telèfons intel·ligents, en què l'espai és molt limitat.

Un bon exemple de canvi de disseny de l'antena a causa d'una modificació de l'especificació és quan l'operador AT&T va canviar els requisits de l'antena cel·lular d'espai lliure a posició de parlar (amb el telèfon disposat al cap *phantom*). Amb la finalitat d'obtenir un disseny de telèfon atractiu sense deixar de complir els requisits OTA (*over the air*, o 'espai lliure') de l'operador i altres normes de rendiment, Motorola va dissenyar i comercialitzar un telèfon prim amb l'antena cel·lular a la part inferior del telèfon. La col·locació de l'antena a la part inferior del telèfon els va permetre dissenyar un factor de forma prim i encara complir el requisit de l'operador amb un gran rendiment en la banda baixa (824-894 MHz). Aquest any va marcar el canvi en la localització de l'antena en el disseny d'antenes.

Els requisits són específics per als operadors; els fabricants de telèfons mòbils també han de complir les regulacions de radiodifusió i d'emissió d'RF que són específiques en cada país. Per exemple, la Comissió Federal de Comunicacions (FCC –accessible en línia) regula les emissions de radiofreqüència als Estats Units d'Amèrica. Entre les regulacions s'inclou SAR, HAC i els requisits GPS 1911.

La SAR es refereix a l'efecte del camp proper de les antenes (figura 4). Les regulacions FCC exigeixen que tots els telèfons utilitzats als Estats Units d'Amèrica han de complir el límit de SAR d'1,6 W/kg de mitjana sobre un volum d'un gram de teixit. En altres països, el límit de la SAR és de 2 W/kg, valor mitjana sobre un volum de deu grams de teixit. El requisit de la SAR és un obstacle que han de superar els fabricants de telèfons. Han de complir les regulacions, o els telèfons no es poden llançar al mercat. Els dissenyadors d'antenes han de garantir el compliment d'aquestes normes.

Una manera de reduir el valor SAR passa per disminuir la potència radiada. Això es duu a terme mitjançant la reducció de la potència de transmissió o dessintonitzant la impedància de l'antena perquè el rendiment de l'antena es degradi. No obstant això, aquesta tècnica de reducció de la SAR podria afectar el rendiment OTA i pot provocar un incompliment dels requisits dels operadors OTA.

Afortunadament, hi ha altres tècniques. La idea general és reduir el camp \vec{E} vers el cap. Un exemple que ajuda a reduir la SAR en la banda baixa (850 MHz) consisteix a moure l'antena situada a la part superior del telèfon vers la part inferior. Per a un telèfon amb bon rendiment OTA i un disseny de factor de forma prim implicaria un repte molt difícil complir el límit de la SAR

Lectura complementària

Sobre els límits SAR, podeu consultar l'obra següent:

IEEE (1998). "Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz". *ANSI/IEEE C95.1*.

si l'antena cel·lular es col·loca a la part superior del telèfon. La ubicació de l'antena és per tant un altre factor important en el disseny d'antenes integrades en plataformes de terminals mòbils.

Figura 4. Sistema de mesura SAR



El dispositiu que radia potència en RF està adherit a la galta del maniquí. Una sonda mesura el camp elèctric generat pel dispositiu dins del *phantom* ple amb els líquids que emulen el teixit humà en les freqüències d'interès.

Les regulacions als Estats Units d'Amèrica per la interferència amb els dispositius auditius d'ajuda a causa dels telèfons mòbils sense fils es van imposar als fabricants de telèfons i operadors al voltant del 2006. Hi ha dos tipus d'interferència relacionats amb HAC: T-bobina (*T-coil*) i emissió d'RF. La interferència deguda a T-bobina és atesa pels enginyers d'acústica i es relaciona amb l'efecte d'acoblament entre la bobina en l'altaveu del telèfon i la de l'audiòfon. Els enginyers d'antena han de tractar amb l'emissió d'interferències RF, concretament els camps propers \vec{E} i \vec{H} que sorgeixen de l'antena cel·lular al voltant de l'altaveu del telèfon. Aquests camps es mesuren dins d'una àrea d'uns $5 \times 5 \text{ cm}^2$ centrada 15 mm per sobre de l'altaveu del telèfon. És obligatori situar-se per sota d'un nivell determinat amb la finalitat de ser compatible. Igual que amb el problema de la SAR, els enginyers d'antenes han de trobar maneres de reduir els camps propers a l'altaveu sense afectar el rendiment OTA dels telèfons.

Un altre repte relacionat amb les antenes té a veure amb les regulacions en l'*Enhanced 911* o E911. Aquest mandat de l'organització FCC va ser creat per assegurar que quan es truca al 911 per a una emergència, l'usuari pot ser localitzat geogràficament amb un cert grau de precisió dins dels trenta segons després de marcar el 911 als Estats Units d'Amèrica. Amb la finalitat de localitzar un usuari d'una manera tan ràpida, no n'hi ha prou amb un sistema GPS independent. El sistema necessita una mica d'ajuda de la xarxa per a adquirir la precisió de la localització requerida en poc temps. Aquest sistema s'anomena *GPS assistit* (aGPS). Independentment que el sistema sigui independent o assistit, el paràmetre més important en el sistema és el rendiment de l'antena.

Lectures complementàries

Sobre les regulacions imposades als Estats Units d'Amèrica als fabricants de telèfons i operadors, podeu consultar l'obra següent:

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNRP). Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz).

Sobre la mesura dels camps propers que sorgeixen de l'antena cel·lular, podeu consultar l'obra següent:

IEEE (2011). "American national standard for methods of measurement of compatibility between wireless communications devices and hearing aids". *ANSI C63* (9-2007).

L'antena GPS ha de ser dissenyada de manera que, amb la condició de cas d'ús, el seu diagrama de radiació tingui una bona cobertura del cel, on se situen els satèl·lits GPS. Malgrat que el sistema aGPS treballa generalment amb facilitat en l'entorn de cel obert, és a dir, sense cap obstrucció entre el cel i el sistema, la diferència entre un disseny d'antena bo o dolent s'aprecia considerablement en entorns urbans i interiors.

Hi ha altres requisits i normes específics per als operadors i els països, però els que s'acaben de descriure són els reptes que els enginyers d'antenes han de superar en la fase de disseny conceptual i de desenvolupament de sistemes d'antenes en terminals mòbils.

1.5. Reptes de disseny de l'antena en els telèfons intel·ligents

En els subapartats anteriors s'han destacat alguns reptes que els enginyers d'antenes han hagut d'afrontar en el disseny d'antenes per a telèfons. Aquests reptes són cada vegada més presents en els terminals mòbils d'avui dia. Els telèfons intel·ligents s'estan convertint en un dispositiu universal que els usuaris de telefonia mòbil aprecien. Aquests terminals integren un gran ventall d'aplicacions i d'aquesta manera es converteixen en alguna cosa més que un telèfon.

Exemples d'aquestes aplicacions inclouen les comunicacions de dades, com la navegació per Internet, la reproducció en temps real (*streaming*) de pel·lícules, l'accés a correu electrònic, el sistema de navegació, el control remot, el geotiquetatge i sistemes de pagament. Totes aquestes aplicacions requereixen l'ús d'una antena construïda en el telèfon intel·ligent, tant si es tracta d'un mòbil, Bluetooth, Wi-Fi, GPS, NFC o de l'antena FM. El desafiament és dissenyar totes les antenes necessàries dins un dispositiu compacte. La col·locació d'aquestes antenes és cabdal perquè l'acoblament entre antenes es minimitzi.

Un altre repte de disseny en terminals mòbils és l'antena addicional necessària per a NFC (*near field communication*), com ara el sistema de pagament Felica al Japó. Aquesta antena NFC es fabrica convencionalment com una bobina ressonant a 13,56 MHz. La bobina està dissenyada en general en una fulla de ferrita per a minimitzar el corrent Eddie creat per la bobina en qualsevol superfície de metall sota l'antena NFC. Les bobines grans i els materials de ferrita sovint poden provocar la degradació del rendiment en altres antenes situades a la rodalia, i això pot complicar altres dissenys d'antena quan l'espai és més limitat.

Com s'ha esmentat en el subapartat anterior, la creació d'un ambient controlat per a les proves OTA de rendiment en els laboratoris ha de ser el més proper possible del veritable cas d'ús. Els operadors estan començant a adoptar i crear els requisits per a les proves de rendiment OTA en la posició de parlar, incloent-hi la mà *phantom* (figura 5). Si bé el mètode de subjecció de proves no representa tot l'espectre de les empunyadures dels usuaris reals, és encara

un pas més amb vista al rendiment de captura d'un veritable cas de condició d'ús. Això força els enginyers d'antenes a parar esment a l'efecte de la mà sobre el rendiment de l'antena, de manera que un sistema pot ser dissenyat per a satisfer el requisit de bona radiació OTA i en condicions d'ús.

Figura 5. Prova d'antena en un telèfon mòbil considerant el cap i les mans *phantom*



Els telèfons intel·ligents d'última generació que són capaços d'oferir LTE augmenten encara més el grau de desafiament que intervé en el disseny d'antena. Per a un sistema LTE en els telèfons mòbils i en dispositius similars, com les tauletes, es necessita una segona antena per a diversitat de recepció/MIMO, juntament amb una antena cel·lular primària. Totes dues antenes operen en la mateixa banda de freqüència. Això significa haver de dissenyar una antena addicional en un petit dispositiu que ja està poblat de múltiples antenes.

Per al disseny MIMO, l'eficiència d'antena, l'aïllament entre antenes, el desequilibri de guany i la correlació entre les dues antenes són paràmetres importants que afecten el disseny d'antenes per als sistemes LTE. En els sistemes MIMO, el guany del sistema òptim s'obté si les dues antenes estan totalment descorrelacionades (estrictament parlant, si els senyals en cadascun dels ports d'antena estan descorrelacionats), tenen un rendiment similar i estan desacoblades. L'augment de la distància entre antenes pot ajudar a assolir un rendiment òptim.

No obstant això, en un entorn com un telèfon mòbil l'espai és limitat. Afortunadament, els requisits de l'operador permeten tolerar en l'antena secundària un grau d'eficiència de 3 dB a 6 dB, aproximadament, per sota del de la primària. Això és útil per al disseny de l'antena secundària, ja que la seva eficiència no ha de ser tan bona com la de l'antena primària. No obstant això, l'aïllament i la correlació continuen sent reptes importants.

La correlació és principalment dependent del diagrama de l'antena en camp llunyà. Les característiques del diagrama de radiació en freqüències de 1.500 MHz i valors superiors generalment depenen de la ubicació de l'antena. Això significa que a una freqüència més alta, els diagrames de radiació de les dues

antenes poden ser molt diferents amb una distància de separació suficient entre ells i per tant normalment no representa cap problema en el compliment dels requisits dels operadors en bandes LTE superiors a 1.500 MHz.

El repte continua sent per a les bandes de freqüències per sota de 1.000 MHz. Això es deu al fet que els diagrames de radiació en aquestes freqüències tenen característiques una mica semblants, i no és important on es col·loquen les antenes dins del telèfon. La raó per a aquesta semblança es deu a la PCB (*printed circuit board*), o pla de massa, que és l'element predominant en la radiació per a una longitud de telèfon típic. Els operadors marquen com a objectiu un coeficient de correlació (*ECC, envelope correlation coefficient*) per sota de 0,5.

L'aïllament és també un desafiament en els telèfons intel·ligents a freqüències inferiors a 1.000 MHz a causa de la petita distància elèctrica entre les antenes. Si no està ben dissenyat, l'eficiència global de totes dues antenes es pot degradar dràsticament, i en comptes de dissenyar un sistema que ofereix una diversitat addicional de processament de rendiment de guany, es pot acabar amb un sistema que té un rendiment similar a, o pitjor que, un sistema convencional amb una sola antena.

S'ha presentat una visió general dels reptes i els problemes d'antena que els enginyers han d'afrontar en les fases de conceptualització i desenvolupament de terminals mòbils. Des del començament de la història dels telèfons mòbils, el grau de desafiament per a dissenyar antenes mai no ha disminuït. Sempre hi ha hagut un augment constant en el nombre de reptes d'una generació a la següent. Enmig de tot això, l'extraordinària creativitat dels dissenyadors d'antenes ha ajudat a superar tots els reptes, que han abastat des del disseny d'un terminal mòbil amb antena externa d'una sola banda fins als terminals més reduïts, prims i lleugers amb antenes miniatura i multibanda i amb els sistemes de múltiples antenes MIMO.

2. Caracterització d'antenes per a terminals mòbils

La caracterització d'antenes ha experimentat un ràpid desenvolupament en els últims vint anys, i una gran part del desenvolupament en la mesura d'antenes ha estat el resultat de la introducció d'antenes en els telèfons mòbils. Per a les antenes tradicionals, com les utilitzades per als radars, els enllaços punt a punt o les estacions base en sistemes macrocel·lulars, el diagrama de radiació té una gran importància. Aquests tipus d'antenes estan específicament dissenyats per a dirigir l'energia en una direcció determinada i evitar la desviació d'energia en altres direccions.

Les antenes dels telèfons mòbils són per naturalesa elèctricament petites, fet que significa que generalment presenten diagrames de radiació omnidireccionals per les reduïdes dimensions de l'element radiant. Això no és necessàriament negatiu: les antenes dels telèfons mòbils s'empren en una orientació arbitrària amb senyals que arriben al dispositiu des de direccions arbitràries. Per tant, el disseny d'antenes de telèfons mòbils cap a un diagrama de radiació específic té un interès petit. Així, els paràmetres utilitzats per a caracteritzar les antenes dels telèfons mòbils tenen un enfocament una mica diferent dels emprats per als tipus tradicionals d'antenes que hem esmentat abans.

Un altre canvi en la caracterització de l'antena està en curs en aquests moments. Aquest canvi es deu a la introducció d'antenes d'elements múltiples, que s'utilitzen per a facilitar la diversitat d'antena o de comunicació MIMO. No obstant això, continuen sent importants les mateixes característiques bàsiques que per a les antenes de telèfons mòbils d'un sol element, si bé es complementen amb paràmetres addicionals per a validar la funcionalitat d'antenes en el sistema de comunicació modern.

2.1. Paràmetre de qualitat per a terminals mòbils

Hi ha diversos paràmetres de qualitat (en anglès, *figures of merit*, FOM) que són interessants per a la caracterització de terminals mòbils.

Els FOM es poden dividir en paràmetres passius i paràmetres actius; els primers són únics d'antena i els segons inclouen circuits de radiocomunicacions.

Aquesta divisió reflecteix una altra diferència fonamental entre els dos grups de FOM, que és que els paràmetres de l'antena passius són valors dels components, mentre que els paràmetres actius són valors composts que combinen el rendiment de diversos components en un sol valor.

2.1.1. Paràmetres d'antena passius

Els paràmetres d'antena passius que s'utilitzen habitualment són els següents:

- a) Eficiència de radiació
- b) Adaptació d'impedàncies
- c) Correlació
- d) Guany de diversitat
- e) Capacitat MIMO

Els dos primers elements són els paràmetres tradicionals d'antena aplicables a tots els tipus d'antenes de dimensions reduïdes, mentre que els tres últims són rellevants per a les antenes d'elements múltiples (MIMO). Això no significa que els dos paràmetres anteriors siguin menys importants per a MIMO; al contrari, l'eficiència de radiació continua sent un dels paràmetres de disseny més importants per a les antenes elèctricament petites.

L'eficiència de radiació d'una antena és bàsicament la relació entre la potència radiada per l'antena i la potència lliurada a l'alimentació de l'antena, la qual cosa implica que és una descripció de les pèrdues internes de l'element d'antena. Això significa que l'eficiència de radiació entra directament en el balanç de l'enllaç del sistema de comunicació, i per tant, té un impacte directe en el rendiment del sistema.

L'eficiència de radiació sovint està associada amb la impedància d'entrada, com els paràmetres de disseny més útils per a les antenes en terminals mòbils. L'eficiència de radiació total (a vegades també anomenada **eficiència de l'antena**) és una combinació d'aquests dos, i es defineix com el producte de l'eficiència de radiació i la **desadaptació**:

$$\eta_a = \eta_r(1 - |S_{11}|^2).$$

També s'ha de parlar d'eficiència de radiació en el cas de MIMO. La manera més adequada per a caracteritzar l'eficiència de cada element d'un sistema MIMO és tenir-ne en compte el rendiment quan els altres elements hi són presents, amb la finalitat de considerar totalment la pèrdua a causa de l'**acoblament**

Lectures complementàries

Sobre l'eficiència de radiació i l'adaptació d'impedàncies, podeu consultar l'obra següent:

M. Andersson; A. Wolfgang; C. Orlenius; J. Carlsson (2009). "Measuring performance of 3GPP LTE terminals and small base stations in reverberation chambers". *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology* (cap. 12). CRC Press.

Per a la resta dels paràmetres de la llista, podeu consultar l'obra següent:

P. S. Kildal; K. Rosengren (2004). "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber". *IEEE Communications Magazine* (vol. 42, pàg. 104-112).

Lectura complementària

Sobre l'eficiència de la radiació, podeu consultar l'obra següent:

A. Andújar; J. Anguera (2012). *Antenes*. Material didàctic UOC.

mutu entre els elements. L'eficiència de radiació de manera que representa l'acoblament mutu es pot anomenar *embedded element efficiency*, on el terme *embedded* denota la presència d'altres elements d'antena propers.

Per exemple, en un sistema format per dues antenes, l'efecte de l'acoblament mutu es té en compte com a $\eta_a = \eta_r(1 - |S_{11}|^2 - |S_{21}|^2)$, en què S_{21} és el paràmetre S que té en compte la interacció entre les dues antenes.

La **correlació** entre ports és aplicable a sistemes d'antenes amb dos ports o més i és una mesura de com són de diferents els senyals en cada port d'antena. Es calcula com la correlació creuada entre els senyals rebuts en dos ports d'antena.

La correlació, com també l'eficiència de radiació i l'adaptació d'impedàncies, són exemples de paràmetres de components, és a dir, paràmetres que mostren directament el rendiment d'una determinada part del sistema de comunicació.

El **guany de diversitat** i la **capacitat MIMO**, els dos últims paràmetres passius en la llista anterior, en realitat són paràmetres composts determinats pels tres primers paràmetres de l'antena passiva que s'acaben d'esmentar: l'eficiència de radiació, la impedància i la correlació.

En la literatura, hi ha diferents definicions de **guany de diversitat** i és important aplicar-les correctament amb la finalitat d'extreure conclusions fonamentades a partir d'un conjunt de dades. La diferència bàsica entre diferents definicions de **diversitat de guany** és com s'insereix l'eficiència de radiació en el paràmetre. Les tres definicions bàsiques del guany de diversitat són l'augment de la diversitat aparent, el guany de la diversitat efectiva i el guany de la diversitat real, en què la diferència és la referència a partir de la qual es calcula el guany de diversitat. La referència pot ser una de les branques de diversitat (guany de diversitat aparent), una antena ideal de referència única (guany de diversitat eficaç) o qualsevol altra antena pràctica per a ser substituïda (guany de diversitat real).

Cal tenir en compte que els paràmetres que hem comentat aquí són quantitats passives integrals, basades en la suposició d'un entorn de trajectes múltiples estadísticament isòtrop que envolta l'antena. Aquest tipus d'entorn és especialment útil per a la caracterització d'antenes de terminals mòbils, no solament per la semblança amb l'entorn en què s'utilitzen la major part dels telèfons mòbils, sinó també perquè és un telèfon orientat arbitràriament a causa de les preferències individuals dels usuaris. Aquest entorn pot ser anomenat *rich isotropic multipath* (RIMP).

Lectura complementària

Sobre el càlcul del guany de diversitat, podeu consultar l'obra següent:

P. S. Kildal; K. Rosengren (2004). "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber". *IEEE Communications Magazine* (vol. 42, pàg. 104-112).

Lectura complementària

Sobre el RIMP, podeu consultar l'obra següent:

P. S. Kildal; C. Orlenius; U. Carlberg (2012). "MIMO LTE OTA measurements in reverberation chamber: rich isotropic reference environment makes agreement with theoretical system model". *Proceedings of the Sixth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Praga.

En alguns casos, hi ha interès en la creació dels paràmetres integrats sobre altres tipus de distribucions espacials. Un exemple d'això és el paràmetre de guany mitjà efectiu, que pot ser descrit com l'eficiència de radiació ponderada respecte d'una certa distribució angular de les ones electromagnètiques que arriben a l'antena sota prova.

Un extrem en el sentit de les distribucions espacials és la línia directa (LOS, *line of sight*), en què hi ha un component de senyal que arriba a l'antena sota prova. És l'oposat directe de l'entorn RIMP, que s'ha esmentat abans, i això significa que aquests dos entorns es complementen entre si. La diferència entre aquests dos entorns és l'efecte que tenen en un sistema de múltiples antenes, com la diversitat o MIMO. Un exemple d'un paràmetre de LOS és el guany de diversitat LOS.

Lectura complementària

Sobre el guany de diversitat LOS, podeu consultar:

P. S. Kildal; J. Carlsson; U. Carlberg (2012). "Definition of antenna diversity gain in user-distributed 3D-random line-of-sight". *IEEE Antennas and Propagation Wireless Letters*.

Lectura complementària

Sobre l'eficiència de radiació ponderada, podeu consultar:

T. Taga (1990). "Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments". *IEEE transactions on vehicular technology* (vol. 39, núm. 2, pàg. 117-131).

2.1.2. Paràmetres d'antena actius

Els paràmetres d'antena actius que s'utilitzen habitualment són els següents:

- f) Potència radiada total (*TRP*, *total radiated power*)
- g) Taxa d'absorció específica (*SAR*)
- h) Sensibilitat isòtropa total (*TIS*) o sensibilitat radiada total (*TRS*)
- i) Sensibilitat mitjana *fading* (*AFS*, *average fading sensitivity*)
- j) Dades de rendiment de bit (*TPUT*, *data bit throughput*)

Els tres primers paràmetres de l'antena enumerats anteriorment es consideren paràmetres tradicionals de caracterització de terminals mòbils. Tant la *TRP* com la *TIS* poden estar directament relacionades amb l'eficiència de radiació total de l'antena del dispositiu, i per tant, s'utilitzen comunament paràmetres per a caracteritzar l'eficiència de radiació de terminals mòbils sense que calgui una connexió directa per cable extern a la seva antena. El paràmetre *SAR* és una mica diferent dels paràmetres d'antena que es descriuen en aquest subapartat, ja que no és pròpiament un paràmetre OTA, sinó una mesura de la taxa d'absorció d'energia en el cap humà quan el terminal mòbil està subjectat a la galta d'un cap *phantom*.

TIS és originalment un paràmetre per a una sola antena, però és possible, quan es mesura en un entorn de *TIS* amb multitrajecte –com el que es recrea en una cambra de reverberació–, estendre la mesura per a incloure-hi el comportament de sistemes amb múltiples antenes.

L'últim paràmetre, el rendiment de dades bit, ha suscitat un gran interès en debats MIMO-OTA en la comunitat científica d'antenes durant els últims anys, sobretot a causa de l'estreta relació que té amb l'experiència de l'usuari final. El principi bàsic subjacent a aquest tipus de mesura del rendiment és crear un entorn de dispersió en què la unitat experimental *fading* o esvaniment i mostra el flux de dades en el temps per a obtenir un valor estadístic de la taxa de bits de dades de la unitat que pot suportar donada una certa potència mitjana disponible. La cambra de mesura en aquest cas ha de poder treballar com un emulador de canal espacial, i hi ha diverses maneres d'aconseguir això, tant amb les cambres reverberants com per mitjà de modificacions de cambres existents (per exemple, les cambres anecoiques).

El processament de dades-bit és essencialment igual a una taxa d'error de mesura pres sobre una seqüència de *fading*, si es tracta d'una taxa d'error de bit (*BER*), d'una taxa d'error de paquet (*PER*), d'una taxa d'error de trama (*FER*) o d'una taxa d'error de bloc (*BLER*). El procés de mostratge de la taxa d'error específicament durant una seqüència d'esvaniment ha estat referit com a sen-

Lectures complementàries

Sobre la *TRP*, podeu consultar l'obra següent:

M. Andersson; A. Wolfgang; C. Orlenius; J. Carlsson (2009). "Measuring performance of 3GPP LTE terminals and small base stations in reverberation chambers". *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology* (cap. 12). CRC Press.

Sobre l'*AFS*, podeu consultar l'obra següent:

C. Orlenius; P. S. Kildal; G. Poilasne (2005). "Measurements of total isotropic sensitivity and average fading sensitivity of CDMA phones in reverberation chamber". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (3-8 de juliol, pàg. 409-412). Piscataway (NJ, EUA).

Sobre les *TPUT*, podeu consultar l'obra següent:

Skårbratt; J. Åsberg; C. Orlenius (2011). "Over-the-air performance testing of wireless terminals by data throughput measurements in reverberation chamber". *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2011)*. Roma.

Lectura complementària

Sobre la *SAR*, podeu consultar l'obra següent:

J. Anguera; A. Pérez (2008). *Teoria d'antenes* (ISBN: 978-84-935665-4-8).

sibilitat mitjana *fading* (AFS) i és molt similar a la realització dels mesuraments de rendiment de dades d'avui dia. És interessant observar que hi ha una relació entre el valor AFS i el TIS d'un dispositiu.

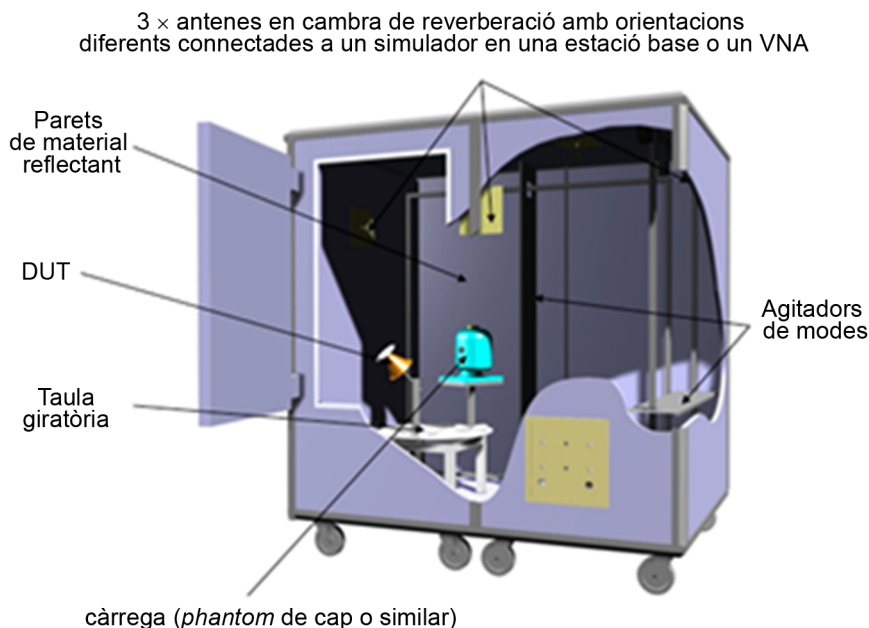
2.2. Mètodes de mesures d'antenes per a terminals mòbils

Hi ha dos tipus dominants de rang per a mesurar antenes petites: cambres anecoiques i cambres de reverberació. Per bé que molts paràmetres accessibles per mitjà de mesures en aquests dos tipus de cambres són idèntics, els mateixos mètodes funcionen en sentits diametralment oposats.

En una **cambra anecoica**, s'elimina tot menys el senyal directe de l'antena de mesura amb l'antena sota prova –per això s'anomena *cambra anecoica*–, de manera que en la configuració de la mesura no hi ha ecos.

Per a mesurar qualsevol paràmetre integral, l'antena sota prova es gira per cobrir tots els angles diferents d'arribada a l'antena. Els paràmetres integrals descrits anteriorment es calculen a partir de la informació donada en cada direcció angular (figura 6).

Figura 7. Cambra de reverberació configurada per a mesures d'antenes per a terminals mòbils



D'altra banda, la **cambra de reverberació** és totalment reflectora i crea un camp amb molts angles d'arribada presents al mateix temps, és a dir, una gran quantitat d'ecos però no una trajectòria del senyal directe.

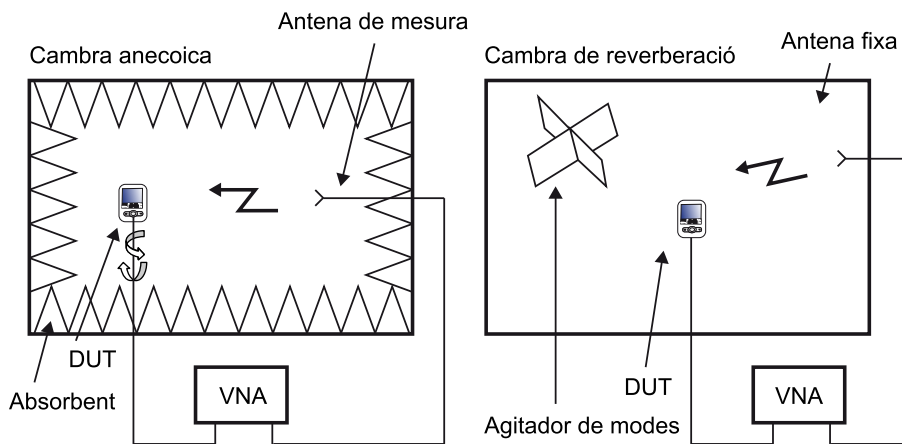


Figura 6. Cambra anecoica formada per un anell amb trenta-una sondes de doble polarització. Permeten mesurar un tall del camp radiat pel dispositiu sota prova. Per fer la mesura en 3D, el suport central efectua un gir en azimuth, i pot efectuar d'aquesta manera mesures 3D. Gentilesa de l'empresa de tecnologia Fractus, Barcelona

Quan els agitadors de modes es mouen, els senyals es combinen de diverses maneres, i sobre una seqüència d'agitació completa tots els angles d'arribada seran igualment probables. Per tant, els paràmetres integrals que s'han descrit abans es poden extreure com un resultat directe d'una seqüència de mesura. La figura 7 mostra un exemple d'una cambra de reverberació.

La figura 8 mostra una configuració esquemàtica d'una cambra anecoica i de reverberació. Cal considerar que la instrumentació és similar entre tots dos mètodes, com per exemple l'ús d'analitzadors de xarxa.

Figura 8. Exemple de configuració per a mesuraments passius (amb cable d'alimentació) d'antenes per a terminals mòbils



Per a mesuraments de terminals actius, el DUT (*device under test*) es reemplaça per un terminal funcional i el VNA (*vector network analyzer*) es reemplaça per un simulador d'estació base.

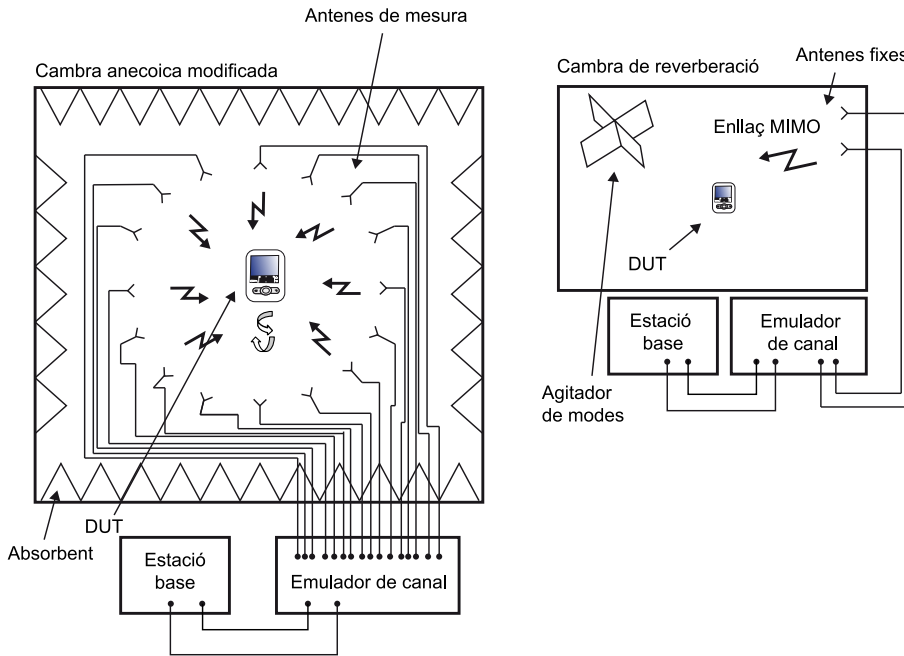
Amb la tendència actual de crear canals d'esvaniment per provar les antenes de telèfons mòbils, hi ha molt de treball en curs amb la finalitat de modificar la cambra anecoica i facilitar l'esvaniment multitrajecte en l'entorn LOS originalment pur. El mètode proposat consisteix en la col·locació d'un anell de sondes en la cambra anecoica i senyals d'alimentació a través d'aquestes antenes perquè es creï un perfil d'esvaniment específic al centre del volum de prova. L'inconvenient d'aquesta modificació és que la cambra s'ha de convertir novament en una cambra anecoica normal.

Les cambres de reverberació tenen un esvaniment multitrajecte inherent a causa de la seva naturalesa reflexiva, i per tant els mesuraments MIMO OTA es poden dur a terme sense cap altra modificació que l'addició d'antenes fixes de mesurament per a facilitar la senyalització MIMO.

La figura 9 mostra les configuracions esquemàtiques per a mesuraments MIMO OTA de reverberació i cambres anecoiques modificades. Totes dues configuracions de mesurament estan equipades amb un emulador de canal per a controlar l'esvaniment. En la cambra anecoica modificada, l'emulador de canal és essencial amb la finalitat de crear l'esvaniment, i es realitza mitjançant l'alimentació de senyals *prefading* en cadascuna de les sondes en la cambra.

En la cambra de reverberació, l'emulador de canal és opcional a causa del seu esvaniment inherent, però el canal emulador dóna una varietat més àmplia de possibles perfils de potència de retard en la configuració de mesura.

Figura 9. Exemple de configuració de mesura activa de terminals mòbils MIMO



La taula 1 mostra un recull dels mètodes de mesura diferents i els paràmetres de qualitat utilitzats per al disseny d'antenes petites que són aplicables en cada mètode.

Taula 1. Mètodes de mesura per a la caracterització d'antenes per a terminals mòbils i paràmetres de qualitat aplicables a cada mètode

FOM	Taula ref.	Cambra de reverberació	Cambra anecoica	Cambra anecoica amb multisondes
Eficiència de radiació	a	Sí	Sí	No
Impedància	b	Sí	Sí	No
Correlació	c	Sí, calculat amb els senyals rebuts	Sí, calculat amb els diagrames de radiació	Sí, calculat directament de senyals rebuts
Guany de diversitat	d	Sí, calculat amb els senyals rebuts	Sí, calculat amb els diagrames de radiació	Sí, directe de les distribucions de senyal rebut
Capacitat MIMO	e	Sí, amb l'estadística del senyal rebut	Sí, amb els diagrames de radiació	Sí, amb l'estadística del senyal rebut
TRP	f	Sí	Sí	No
SAR	g	No	No	No
TIS o TRS	h	Sí	Sí	No
TIS o TRS incloent-hi la recepció de diversitat	h	Sí	No, no hi ha multicamí en la cambra anecoica	No
Average fading sensitivity (AFS)	i	Sí	No, no hi ha multicamí en la cambra anecoica	Sí

FOM	Taula ref.	Cambra de reverberació	Cambra anecoica	Cambra anecoica amb multisondes
<i>Data bit throughput (TPUT)</i>	j	Sí	No, no hi ha multicamí en la cambra anecoica	Sí

3. Tecnologia d'antenes per a terminals mòbils

La incorporació massiva de terminals mòbils, com els telèfons mòbils, en les nostres vides ha canviat la concepció de la seva funcionalitat. Avui dia, els telèfons mòbils no solament s'utilitzen per a comunicar-se sinó que també ofereixen una àmplia varietat de serveis, com càmera digital, reproductor de vídeo, connexió a Internet, localització geogràfica, serveis de televisió o ràdio FM. En aquest sentit, la indústria d'antenes es veu obligada a evolucionar constantment per a obtenir antenes miniatura multibanda i capaces de radiar de manera eficient en un entorn tan hostil.

D'una banda, les limitacions de volum en terminals mòbils provinents de la reducció de l'espai disponible a causa de l'existència de múltiples components (com ara pantalles, bateries, altaveus, blindatges) han de ser considerades per a optimitzar el rendiment de l'antena. D'altra banda, la interacció de l'usuari també s'ha de tenir en compte des de dues perspectives. En primer lloc, la quantitat d'energia absorbida pel cos humà, especialment el cap i la mà, ha de ser minimitzada; en segon lloc, l'antena ha de ser robusta pel que fa a la interacció humana, que causa l'absorció d'energia i efectes de dessintonització d'impedàncies. Minimitzar les pèrdues de potència és un aspecte important, ja que produeixen un consum més elevat de bateria i eventualment talls en la comunicació.

Amb l'objectiu de revisar les característiques de diferents antenes que es poden trobar en els terminals mòbils actuals o emergents, aquest apartat es divideix en tres parts principals. En primer lloc, es presenten tècniques d'antenes per a aplicacions de recepció, en concret per a recepció d'FM (88-108 MHz); en segon lloc, es fa una anàlisi breu d'antenes per a aplicacions de curt abast, i finalment, es resumeixen alguns avenços en el camp de les antenes de telèfons mòbils.

3.1. Antenes de recepció: FM

El repte de dissenyar antenes per a proporcionar un funcionament correcte en el servei d'FM en terminals mòbils es basa sobretot en les limitacions de la mida.

Pel que fa al servei FM, una antena monopòl convencional ($\lambda/4$) que funcioni a freqüències d'FM requereix 75 cm de longitud, fet que dificulta considerablement la integració en un telèfon mòbil. Amb la finalitat de superar aquesta limitació, alguns fabricants de telèfons mòbils incorporen l'antena d'FM en el cable dels auriculars, el que no suposa una solució sense fils. Altres solucions que es troben en la literatura proposen l'ús d'esquemes actius, cosa que deriva en un increment no volgut del consum de la bateria. Amb la finalitat de resoldre les deficiències esmentades abans, en aquest subapartat s'expliquen dues tècniques per al disseny d'antenes internes en la banda d'FM, basades en:

- Elements no ressonants.
- Reutilització d'una antena PIFA que opera en els serveis de comunicacions mòbils.

3.1.1. Elements no ressonants

A continuació es descriu breument el problema de dissenyar una antena ressonant, com una espiral en la banda d'FM, tenint en compte l'espai reduït d'una PCB.

Atès que l'espai disponible és limitat, l'acoblament entre pistes de l'antena obliga a augmentar la longitud total a fi d'assolir la ressonància volguda, que resulta així en una longitud més gran que $\lambda/4$.

Per exemple, per a assolir la ressonància a 100 MHz en un volum d'antena de 40 mm × 20 mm × 5 mm, es necessita una longitud de 2.262 mm, superior a un quart de longitud d'ona en aquesta freqüència de funcionament ($\lambda/4 = 750$ mm).

A més a més, a causa de les limitacions de volum que hem esmentat abans, l'antena ha de ser prima. Aquesta limitació en l'amplària de disseny pot incrementar d'una manera considerable les pèrdues òhmiques, i produir així una radiació pobra. Amb la finalitat de resoldre aquestes limitacions, la idea proposada passa per substituir una **antena ressonant** per una antena no resso-

Lectures complementàries

Podeu consultar altres solucions proposades en la literatura sobre l'ús d'esquemes actius en l'obra següent:

Skårbratt; J. Åsberg; C. Orlenius (2011). "Over-the-air performance testing of wireless terminals by data throughput measurements in reverberation chamber". *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2011)*. Roma.

Sobre els elements no ressonants, podeu consultar les obres següents:

J. Anguera; D. Aguilar; J. Vergés; M. Ribó; C. Puente (2008). "Handset antenna design for FM reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EUA).

D. Aguilar; J. Anguera; M. Ribó; C. Puente (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and optical technology letters* (vol. 50, núm. 10).

Sobre la reutilització d'una antena PIFA operant en els serveis de comunicacions mòbils, podeu consultar les obres següents:

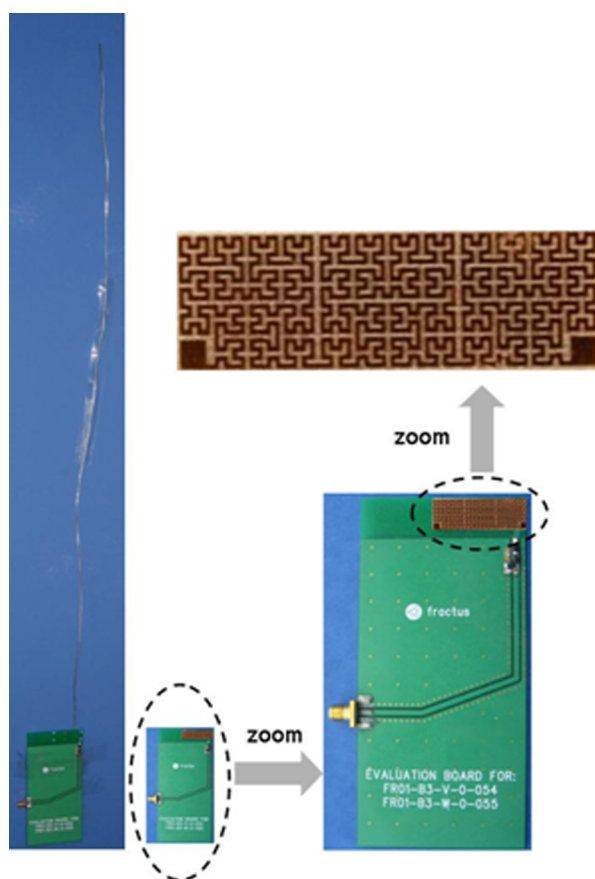
J. Anguera; C. Borja; C. Picher; A. Andújar. "Wireless device providing operability for broadcasting standards and method enabling such operability". Sol·licitud de patent WO/2010/145825.

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Borja; C. Puente; S. Kahng (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pàg. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Itàlia).

nant inspirada en la geometria fractal de Hilbert amb un element inductiu de Q elevada que porta l'antena a la ressonància. Amb aquest enfocament, s'obté un augment de l'eficiència (al voltant de 20 dB).

Per bé que l'eficiència de l'element no ressonant és considerablement reduïda, al voltant d'un 1%, aquests valors resultarien encara acceptables per a la recepció d'FM per dues raons. En primer lloc, la potència de transmissió d'estacions de radiodifusió FM és de l'ordre de kW. En segon lloc, la pèrdua de potència en espai lliure per a FM no és tan crítica com altres serveis de telecomunicacions, com ara les comunicacions cel·lulars (GSM); per exemple, a 100 MHz, la pèrdua en l'espai lliure és d'uns 20 dB menys que a 900 MHz. Com a resultat d'això, hi ha més potència disponible en l'aire. Amb aquesta condició, es proposa una **antena miniatura** compacta per a la recepció d'FM inspirada en la geometria fractal de la corba de Hilbert, que es converteix en adequada per a ser integrada en els terminals mòbils actuals gràcies a les dimensions reduïdes que té, de tan sols 30 mm × 10 mm × 1 mm (figura 10).

Figura 10. Prototips fabricats



Antena externa (longitud de 75 cm) i antena interna inspirada en el fractal de Hilbert (30 mm × 10 mm) integrades dins una plataforma de telèfon intel·ligent
Font: Borja, Anguera, Puente i Vergés (2010); Puente, Rozan i Anguera.

A més dels paràmetres electromagnètics comuns, com ara ROE ('relació d'ona estacionària', en anglès SWR, *standing wave ratio*), diagrames de radiació i l'eficiència, es proposa un altre paràmetre de qualitat per a avaluar el rendiment de les antenes per a la recepció d'FM. Es basa a desmodular el senyal d'RF a un senyal d'àudio. Aquest procediment es presenta en el subapartat següent,

Lectures complementàries

J. Anguera; D. Aguilar; J. Vergés; M. Ribó; C. Puente (2008). "Handset antenna design for FM reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EUA).

D. Aguilar; J. Anguera; M. Ribó; C. Puente (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and optical technology letters* (vol. 50, núm. 10).

Lectures complementàries

J. Anguera; A. Sanz (2007). "Wireless portable device including internal broadcast receiver". Sol·licitud de patent WO 2007/128340.

C. Borja; J. Anguera; C. Puente; J. Vergés (2010). "How much can be reduced the internal FM antenna of mobile phones, yet still listening to the FM radio properly?". *European Conference on Antennas and Propagation*. EuCAP 2010, Barcelona (Espanya).

C. Puente; E. Rozan; J. Anguera. "Space filling miniature antennas". Sol·licitud de patent WO 01 54225.

en què el rendiment de l'antena proposada de Hilbert es compara amb el rendiment d'un monopòl $\lambda/4$ i es conclou que la solució de Hilbert ofereix una qualitat similar d'àudio del senyal rebut amb l'avantatge d'unes dimensions reduïdes i més capacitats d'integració.

3.1.2. Reutilització de l'antena de telefonia mòbil

Aquest subapartat presenta una solució que va un pas més enllà per a integrar una antena en un receptor d'FM en un terminal mòbil. La tècnica proposada se centra en la reutilització d'una antena que funciona en bandes cel·lulars. En aquest sentit, una PIFA dissenyada per a funcionar en dos estàndards GSM (900 i 1.800 MHz) (figura 11a) es pot reutilitzar perquè sigui operativa en la banda d'FM.

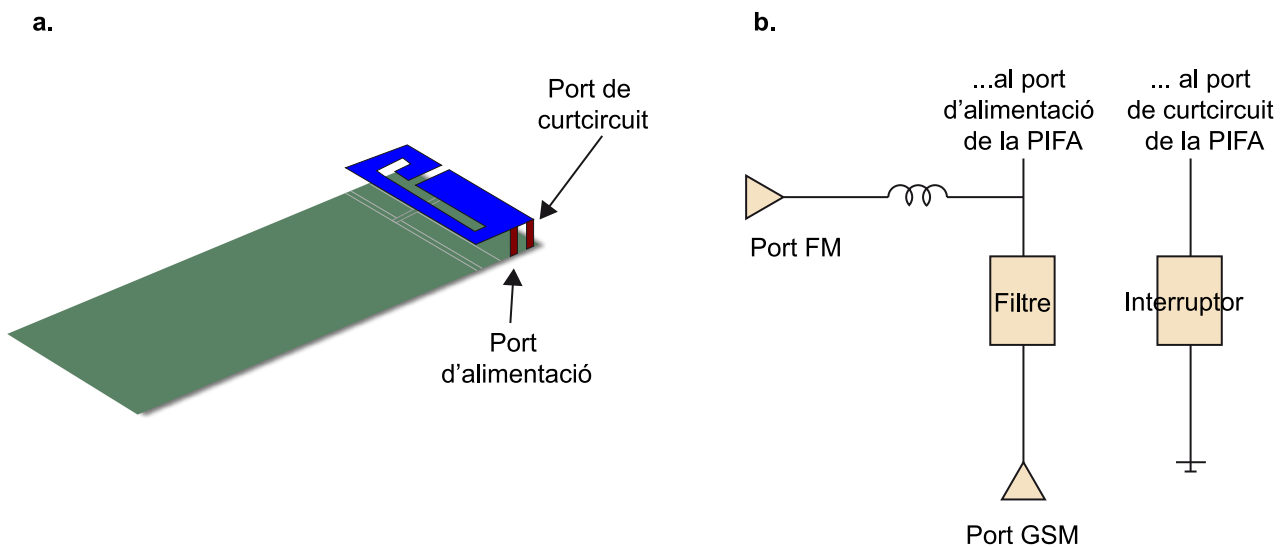
La PIFA es comporta com un element no ressonant a freqüències d'FM. La longitud requerida de 75 cm per a comportar-se com un monopòl $\lambda/4$ és lluny de les dimensions de la PIFA. Per tant, un inductor en sèrie de Q elevada s'hi afegeix amb la finalitat de compensar el comportament capacitiu de la PIFA en freqüències d'FM (figura 11b).

Lectura complementària

Sobre PIFA dissenyades per a funcionar en dos estàndards GSM, podeu consultar l'obra següent:

J. Anguera; D. Aguilar; J. Vergés; M. Ribó; C. Puente (2008). "Handset antenna design for FM reception". *IE-EE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EUA).

Figura 11



a. Vista 3D d'una PIFA. Dimensions del pla de massa de 100 mm × 40 mm i PIFA de 38 mm × 15 mm × 6 mm; b. Xarxa d'adaptació proposada que inclou un circuit de commutació, un filtre i un inductor en sèrie.

La PIFA té un port d'alimentació i un port que curtcircuita l'antena amb el pla de massa amb l'objectiu de realitzar adaptació d'impedàncies. Amb la finalitat de garantir una bona resposta en la banda d'FM, la connexió de curtcircuit ha de ser eliminada perquè la distància entre els ports és elèctricament petita a aquestes freqüències, i es produeix una antena en curtcircuit amb el rendiment electromagnètic pobre en la banda d'FM.

Per a garantir la bona radiació en les bandes de freqüència volgudes (FM i GSM 900/1800), es necessita un circuit d'adaptació (figura 11b). La PIFA utilitzada aquí no requereix cap xarxa d'adaptació en les freqüències de GSM però en FM cal un inductor en sèrie de 1.000 nH. Tots dos ports estan aïllats per mitjà d'un filtre i l'inductor en sèrie. El filtre està dissenyat per a rebutjar el senyal d'FM en el port GSM ja que el senyal de GSM en el port d'FM ja està rebutjat per la inductància en sèrie que presenta una impedància elevada en freqüències GSM. Finalment, es necessita un circuit de commutació en el port del curt amb la finalitat de desconnectar aquest port del pla de massa quan s'opera en la banda d'FM.

S'ha demostrat que una alta potència rebuda no significa necessàriament una millor qualitat del senyal. En alguns casos, una baixa potència rebuda ofereix una recepció d'àudio satisfactòria, mentre que una alta potència rebuda presenta una SNR (relació senyal-soroll) baixa, que porta a una disminució de la qualitat de recepció d'àudio. Per aquesta raó, s'ha realitzat un procediment subjectiu per a avaluar la qualitat del senyal desmodulat respecte de la PIFA, el monopòl de longitud de 75 cm, com també el monopòl anterior basat en el fractal de Hilbert.

Lectures complementàries

Podeu consultar la demostració del fenomen esmentat en l'obra següent:

D. Aguilar; J. Anguera; M. Ribó; C. Puente (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, núm. 10).

Per a avaluar la qualitat del senyal desmodulat respecte de la PIFA, podeu consultar:

C. Borja; J. Anguera; C. Puente; J. Vergés (2010). "How much can be reduced the internal FM antenna of mobile phones, yet still listening to the FM radio properly?". *European Conference on Antennas and Propagation*. EuCAP 2010, Barcelona (Espanya).

Sobre els monopòls basats en el fractal de Hilbert:

J. Anguera; C. Puente; E. Martínez; E. Rozan (2003). "The fractal Hilbert monopole: A two-dimensional wire". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 36, núm. 2, pàg. 102-104).

C. Puente; E. Rozan; J. Anguera. "Space filling miniature antennas". Sol·licitud de patent WO 01 54225.

Lectures complementàries

Sobre la configuració de l'antena PIFA que hem explicat aquí, podeu consultar l'obra següent:

J. Anguera; C. Borja; C. Picher; A. Andújar. "Wireless device providing operability for broadcasting standards and method enabling such operability". Sol·licitud de patent WO/2010/145825.

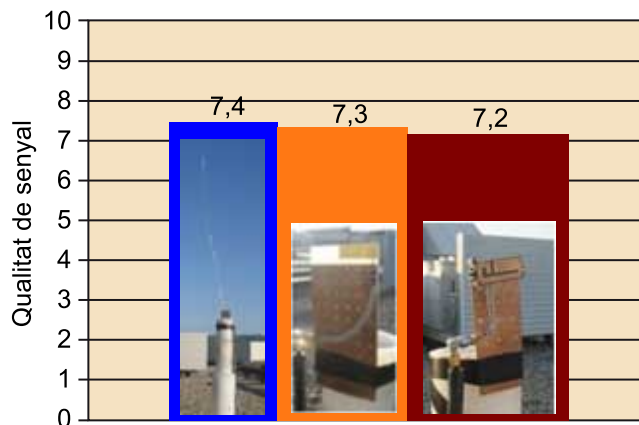
C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Borja; C. Puente; S. Kahng (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pàg. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Itàlia).

Aquest procediment consisteix en la quantificació de la qualitat del senyal d'FM rebut per l'antena. L'indicador de qualitat del senyal està afiatat en el marge de 0 a 10 depenent de la qualitat del canal d'FM que escolti l'usuari, en què 0 i 10 són la pitjor i la millor puntuacions, respectivament.

Encara que tingui la màxima potència rebuda, l'avaluació final del monopòl no es diferencia de les altres. La nota final del monopòl $\lambda/4$ és 7,4, la puntuació final de l'antena de Hilbert és 7,3, i finalment, la de la PIFA és 7,2 (figura 12), amb l'avantatge que aquesta antena també pot funcionar en les bandes de comunicacions mòbils.

Cal assenyalar que el cos humà també s'ha tingut en compte i la conclusió a què s'arriba és que en alguna posició, com si se sosté el dispositiu amb la mà, l'eficiència d'antena total es millora en 10 dB. Aquesta millora es deu al fet que a aquesta baixa freqüència el cos humà actua com una antena dielèctrica amb unes dimensions comparables a la longitud d'ona d'operació, de manera que es converteix en un radiador eficient (un cos humà d'1,7 m a 100 MHz és $0,56\lambda$).

Figura 12. Puntuacions obtingudes per mitjà de l'avaluació de qualitat després de fer la mitjana de 28 canals FM



En conclusió, la PIFA ofereix el mateix rendiment satisfactori que el monopòl de referència, mentre que assegura la integració de l'antena FM en terminals mòbils.

A més a més, es poden utilitzar altres tècniques d'antenes de telèfons mòbils, com ara els plans de massa ranurats (com es descriu en els subapartats següents), en combinació amb la PIFA per a obtenir una antena heptabanda (FM, GSM 850/900/1800/1900, LTE, UMTS, Bluetooth / Wi-Fi).

Un dels avantatges principals de la tècnica proposada és que no cal cap antena addicional, ja que es reutilitza l'antena mòbil existent.

Lectura complementària

Sobre la quantificació de la qualitat del senyal rebut, podeu consultar l'obra següent:

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Borja; C. Puente; S. Kahng (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pàg. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Itàlia).

Lectures complementàries

Sobre les anàlisis tenint en compte el cos humà, podeu consultar les obres següents:

J. Vergés; J. Anguera; C. Puente; D. Aguilar (2009). "Analysis of the human body on the radiation of FM handset antenna". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 51, núm. 11, pàg. 2588-2590).

A. Pladevall; C. Picher; A. Andújar; J. Anguera (2011). "Some thoughts on human body effects on handset antenna at the fm band". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 19, pàg. 121-132).

3.2. Short range wireless

Short range wireless es refereix en general a les aplicacions caracteritzades perquè tenen una petita potència de transmissió (de l'ordre de mW), funcionament a l'interior i un rang de metres i una amplada de banda limitats (aproximadament, el 4% per a l'aplicació Bluetooth).

Són exemples de sistemes de curt abast sense fil Bluetooth, Wi-Fi, Zigbee i RFID. La major part dels terminals mòbils incorporen una antena de curt abast per a Bluetooth / serveis WLAN. La mida de l'antena és novament un aspecte important que s'ha de considerar, ja que la freqüència central d'operació de Bluetooth és 2,45 GHz, que significa que una antena de $\lambda/4$ és de 30 mm.

Aquesta mida resulta encara considerable, tenint en compte la limitació d'espai del dispositiu a causa de les pantalles, les bateries, els altaveus, a més de la necessitat d'integració d'altres múltiples antenes, com ara les destinades a la comunicació mòbil. Per tant, el desafiament es basa a dissenyar l'antena tan petita com sigui possible per a simplificar-ne la integració en un dispositiu portàtil sense fil preservant-ne al mateix temps el rendiment electromagnètic.

Per a afrontar el repte de miniaturització d'antenes per a aplicacions de curt abast sense fil, es proposen dues categories força descrites en la literatura:

- Basades en geometria.
- Basades en materials.

D'una banda, l'antena basada en la geometria es fonamenta en el disseny de geometries d'antena capaces de treure el màxim profit de l'espai disponible. Un exemple d'això es troba en geometries de farciment espacial (*space-filling*). D'altra banda, les antenes basades en materials se centren en l'ús de materials d'una constant dielèctrica elevada, com ara ceràmiques capaces de proporcionar la miniaturització requerida.

La idoneïtat de les geometries d'emplenament en el disseny d'antenes petites ha estat molt investigada. En aquest cas, les antenes petites, com el monopòl de Hilbert, es descriuen àmpliament en la literatura per demostrar que una antena pot ser elèctricament més petita a mesura que augmenta el nombre d'iteracions. Amb l'ús d'aquest tipus de tècnica de miniaturització, és possible reduir la grandària elèctrica d'un monopòl convencional d'un quart de longitud d'ona fins a un factor 11.

Per a analitzar els beneficis de la corba de Hilbert en el disseny d'antenes petites, es duu a terme una comparació amb una antena espiral (figura 13). Dues antenes estan dissenyades per ressonar a la mateixa freqüència de 84,5 MHz, ocupen el mateix espai i tenen la mateixa amplària de pista conductora. En-

Lectures complementàries

Sobre les geometries de farciment espacial:

J. Anguera; C. Puente; E. Martínez; E. Rozan (2003). "The fractal Hilbert monopole: A two-dimensional wire". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 36, núm. 2, pàg. 102-104).

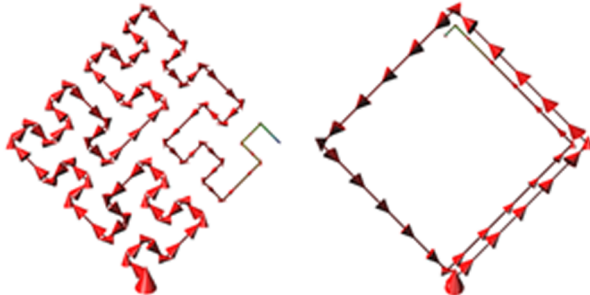
I. Sanz; J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; C. Borja (2010). "The Hilbert monopole revisited". *European Conference on Antennas and Propagation*, EuCAP. Barcelona.

Sobre les antenes basades en materials:

K. L. Wong (2003). "Planar antennas for wireless communications". Wiley Inter-Science.

cara que l'espiral necessita menys pista per a ressonar en 84,5 MHz, l'amplada de banda de l'antena de Hilbert és 1,62 més gran per a la mateixa eficiència de radiació.

Figura 13. Distribució vectorial de corrents de les antenes en la freqüència de ressonància de $f = 84,5$ MHz



Gràcies a les propietats de miniaturització que tenen, les antenes basades en geometries d'emplenament són adequades per a dissenyar antenes eficients, petites i multibanda. Alguns exemples d'aplicacions de *short range wireless* (per exemple, auriculars sense fils, telèfons cel·lulars, Bluetooth, dispositius USB) s'han adoptat en la indústria (figura 14).

Figura 14. Antena SMD basada en corbes d'emplenament per a aplicacions de 2,4-2,5 GHz



L'antena mesura 4,1 mm × 2 mm × 1 mm (4,1 mm és 0,033λ en 2,45 GHz). Gentilesa de l'empresa de tecnologia Fractus, Barcelona

Les antenes basades en la geometria d'emplenament s'ha demostrat que són radiadors eficaços que mostren que no solament són rellevants la longitud i les dimensions de la pista conductora, sinó que la geometria també exerceix un paper important en el rendiment d'una antena petita.

Una antena petita amb 4,1 mm × 2 mm × 1 mm per a operar en la banda de 2,4-2,5 GHz mostra una eficiència total superior al 50%, la qual cosa resulta especialment atractiva per als fabricants de terminals mòbils (figura 15).

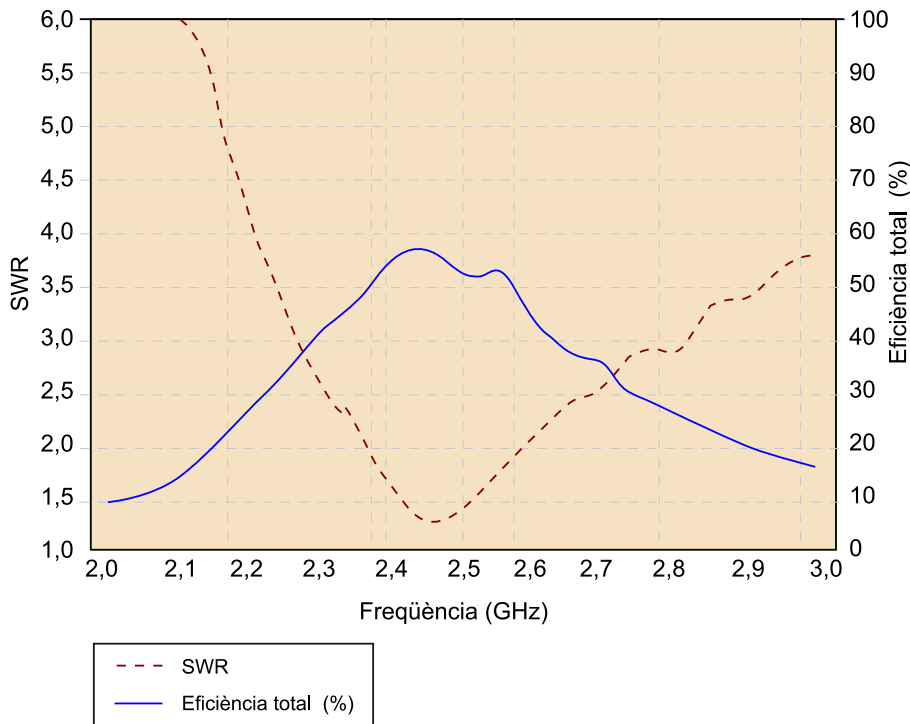
Lectures complementàries

Sobre l'anàlisi dels beneficis de la corba de Hilbert, podeu consultar les obres següents:

S. R. Best (2002). "A comparison of the performance properties of the Hilbert curve fractal and meander line monopole antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 35, núm. 4, pàg. 258-262).

I. Sanz; J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; C. Borja (2010). "The Hilbert monopole revisited". *European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona: EuCAP.

Figura 15. Mesura de *SWR* i eficiència total per a la banda de 2,4-2,5 GHz de l'antena que es mostra en la figura 14



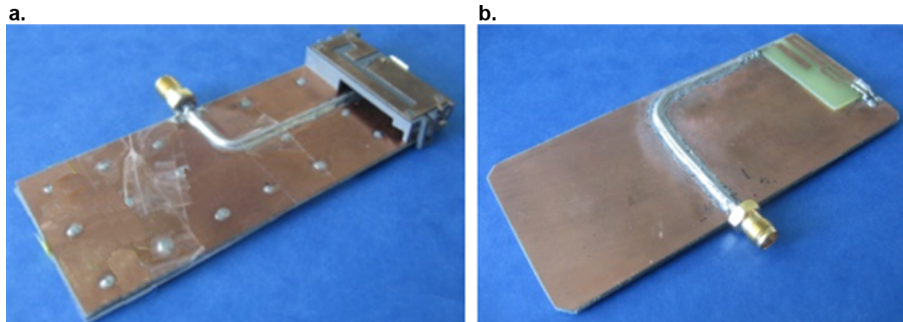
3.3. Antenes per a comunicacions mòbils

En aquest subapartat es descriuen algunes tècniques d'antena per a comunicacions mòbils. En la primera part, es presenten alguns tipus d'antena utilitzant monopols i la combinació de PIFA i ranures. En segon lloc, s'il·lustra una arquitectura d'antenes robusta a la càrrega de la mà. En tercer lloc, es presenta una xarxa d'adaptació per a augmentar l'amplada de banda. En quart lloc, s'analitza el benefici de la manipulació del pla de massa. I, finalment, es descriu una tecnologia d'antena innovadora, basada en l'ús d'elements compactes per a excitar el pla de massa de terminals mòbils.

3.3.1. Radiadors

Avui dia, les antenes internes, com pedaços (*patch*)/PIFA i monopols, són els dissenys més comuns per a terminals (figura 16).

Figura 16. Prototips d'antenes multifreqüència per a telèfon mòbil



a. Antena PIFA; b. Monopols acoblats.

Quant a les PIFA, s'utilitzen diverses tècniques ben conegudes per a proporcionar operacions de banda dual o multibanda, com el disseny d'estructures amb diverses branques o l'ús de plans de massa ranurats en combinació amb la PIFA. Aquest fet augmenta la complexitat del disseny i en dificulta la integració en plataformes primes, ja que per a garantir el bon funcionament l'antena PIFA ha d'estar disposada a una certa altura respecte al pla de massa, i ocupa un volum considerable ($\approx 2.000-4.000 \text{ mm}^3$). Les antenes monopòl són un disseny alternatiu per a proporcionar operació multibanda en plataformes primes, principalment a causa de les característiques de baix perfil que tenen.

Entre els mètodes de fabricació, els més utilitzats són MID (*molding injection device*), *flex-film* i *metal-stamping*. El primer imprimeix mitjançant un procés làser la part conductora directament sobre el suport de l'antena, cosa que permet conformar l'antena en superfícies corbes. *Flex-film* imprimeix la part conductora en un adhesiu que, si bé es pot conformar, no presenta la mateixa llibertat que MID. Finalment, *metal-stamping* consisteix a col·locar el metall d'antena sobre el suport. Aquest metall se subjecta mitjançant un procés que fon uns petits pins que, en fondre's, creen un fixament del metall sobre l'antena. Està més limitat a superfícies planes (figura 17).

En aquest subapartat es comenten breument dos tipus de radiadors. El primer emprava antenes monopòl. El mecanisme per a obtenir una operació multibanda i una amplada de banda suficient s'aconsegueix amb una estructura basada en elements paràsits. El segon radiador combina una PIFA amb una ranura per a obtenir un disseny modular en el sentit que el nombre de bandes es controla independentment amb cadascun dels radiadors.

Lectures complementàries

Sobre les antenes internes, podeu consultar les obres següents:

Taga; K. Tsunekawa (1987). "Performance analysis of a built-in planar inverted-F antenna for 800MHz band portable radio units". *IEEE Transactions on Selected Areas in Communication* (vol. SAC-5, núm. 5, pàg. 921-929).

M. Martínez-Vázquez; O. Litschke; M. Geissler; D. Heberling; A. M. Martínez-González; D. Sánchez-Hernández (2006). "Integrated planar multiband antennas for personal communication handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 2).
Sobre les antenes monopòl, podeu consultar:

C. Lin; K. L. Wong (2007). "Printed monopole slot antenna for internal multiband mobile phone antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 55, núm. 12, pàg. 3690-3697).

Figura 17. Tècniques de fabricació d'antenes per a telèfons mòbils



a. MID; b. Flex-film, c. Metal-stamping

Elements paràsits: monopols acoblats

L'ús d'antenes monopol en terminals mòbils ha augmentat en els últims anys gràcies al baix perfil que tenen, fet que en simplifica la integració en les plataformes sense fils.

Són diversos els dissenys que han aparegut en la literatura i en la indústria amb l'objectiu de cobrir el màxim nombre de bandes de freqüència que sigui possible sense reduir el rendiment de l'antena. S'obté comportament multibanda (GSM 850/900/1800/1900 i UMTS) amb una tècnica que utilitza elements paràsits acoblats a un element directament alimentat (*driven element*). Al mateix temps, la proposta maximitza l'espai lliure en la PCB per integrar altres components cel·lulars.

L'antena proposada també té un perfil pla que és interessant per a les plataformes primes (figura 18). L'element alimentat és més a prop del pla de massa, separat a una distància dels elements paràsits. L'àrea de pla de massa situat al costat dret de l'antena proporciona un espai útil per a integrar alguns elements típics d'aquest tipus de dispositiu, com la càmera o l'altaveu. D'altra banda, el disseny té en compte les variables més importants en la definició dels rangs de freqüència d'operació. Aquestes variables són les longituds dels elements i l'espai entre ells, cosa que en determina l'efecte d'acoblament. A més a més, la ubicació dels elements determina el comportament correcte, sobretot en les bandes de baixa freqüència (GSM 850 / GSM 900).

L'acoblament entre el *driven* i un element paràsit permet l'aparició d'un bucle d'impedància en la carta de Smith. Si es controla de manera adequada l'acoblament entre tots dos elements, el comportament pot ser de banda ampla o multibanda. Els models elèctrics es poden utilitzar per a obtenir una visió física en el mecanisme d'acoblament. En aquest cas concret, un primer element paràsit està fortament acoblat a l'element *driven* per a obtenir dues bandes separades (figura 18). Un altre element paràsit (paràsit #2, figura 18) està acoblat feblement al *driven* per a obtenir una banda ampla en la regió superior.

Lectures complementàries

Sobre els diversos dissenys d'antenes monopol, podeu consultar les obres següents:

K. L. Wong; G. Y. Lee; T. W. Chiou (2003). "A low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 51, núm. 1, pàg. 121-125).

C. T Lee; K. L. Wong (2010). "Planar monopole with a coupling feed and an inductive shorting strip for LTE/GSM/UMTS operation in the mobile phone". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 7, pàg. 2479-2483).

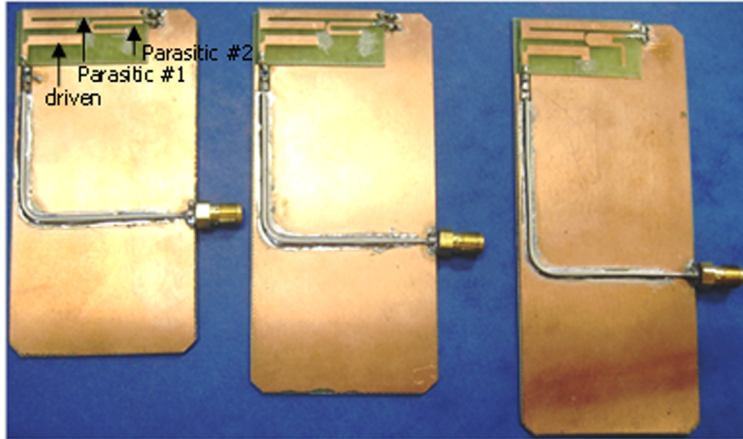
Sobre la tècnica de monopols acoblats:

J. Anguera; A. Condes; J. Soler; C. Puente. "Coupled multiband antennas". Sol·licitud de patent WO 04/025778.

S. Risco; J. Anguera; A. Andújar; A. Pérez; C. Puente (2010). "Coupled monopole antenna design for multiband handset devices". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 52, núm. 10, pàg. 359-364).

Cal assenyalar que es troba l'efecte similar en antenes *microstrip* formades per un alimentador i un element paràsit. Per tant, l'ús dels models elèctrics és útil per a entendre el comportament d'impedància de les antenes.

Figura 18. Prototips amb monopols acoblats en plans de massa de 45 mm d'amplària × 90 mm, 100 mm i 110 mm de llargària



L'element *driven* està alimentat per mitjà d'una línia de transmissió d'impedància característica de 50 Ω (cable microcoaxial).

El disseny té una superfície de 35 mm × 15 mm i 1 mm d'alçària per a aconseguir un comportament multibanda que cobreixi diversos estàndards de comunicació GSM, LTE, CDMA i UMTS.

Combinació de radiadors: PIFA i ranures

La PIFA i les ranures s'han estudiat àmpliament en la literatura. Bàsicament, la PIFA requereix un volum 3D per a radiar de manera eficient, mentre que l'antena de ranura pot ser completament plana. No obstant això, a causa del pla de massa, l'espai sota l'antena, en general, no pot ser reutilitzat per a col·locar-hi altres components, com ara altaveus, bateries, blindatges, etc., ja que podria afectar de manera negativa el rendiment de l'antena. Amb la finalitat de combinar els beneficis de la PIFA i les antenes de ranura (estructures planes), s'il·lustra un concepte que combina una PIFA amb una antena de ranura. Altres tipus de combinació com ara monopoli i antenes de ranura utilitzant una estructura autocomplementària s'han proposat en Takemura (2009).

Lectures complementàries

Sobre la PIFA i les ranures, podeu consultar:

Taga; K. Tsunekawa (1987). "Performance analysis of a built-in planar inverted-F antenna for 800 MHz band portable radio units". *IEEE Transactions on Selected Areas in Communication* (vol. SAC-5, núm. 5, pàg. 921-929).

C. Lin; K. L. Wong (2007). "Printed monopole slot antenna for internal multiband mobile phone antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 55, núm. 2, pàg. 3690-3697).

C. H. Wu; K. L. Wong (2008). "Hexa-band internal printed slot antenna for mobile phone application". *Microwave and Optical technology Letters* (vol. 50, pàg. 35-38).

Sobre l'ús d'una estructura autocomplementària:

Lectura complementària

Sobre l'ús de models elèctrics, podeu consultar l'obra següent:

S. Risco; J. Anguera; A. Andújar; A. Pérez; C. Puente (2010). "Coupled monopole antenna design for multi-band handset devices". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 52, núm. 10, pàg. 359-364).

N. Takemura (2009). "Inverted-FL antenna with self-complementary structure". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 10, pàg. 3029-3034).

A continuació es presenta un exemple de com funciona el concepte:

- La figura 19a mostra una ranura en un pla de massa que és de 100 mm × 40 mm. En aquest cas, la ranura s'excita al voltant de 1.900 MHz, que es tradueix en una antena de ranura de $\lambda/4$. L'amplada de banda obtinguda cobreix GSM 1800-UMTS amb una ROE ≤ 3 .
- La figura 19b mostra una PIFA de 900 MHz en el pla de massa del dispositiu. El mecanisme d'alimentació està en la mateixa posició que el que s'ha utilitzat per a excitar la ranura anterior.
- Tots dos dissenys es combinen, és a dir, la PIFA i la ranura comparteixen el mateix mecanisme d'alimentació (figura 19c).
- L'antena combina tots dos coeficients de reflexió (figura 19d). Per a augmentar l'amplada de banda en la segona banda, es pot incrementar l'amplària de la ranura.

Lectures complementàries

Podeu consultar l'exemple que hem proposat aquí en les obres següents:

J. Anguera; I. Sanz; J. Mumburú; C. Puente (2010). "Multi-band handset antenna with a parallel excitation of PIFA and slot radiators". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 2, pàg. 348-356).

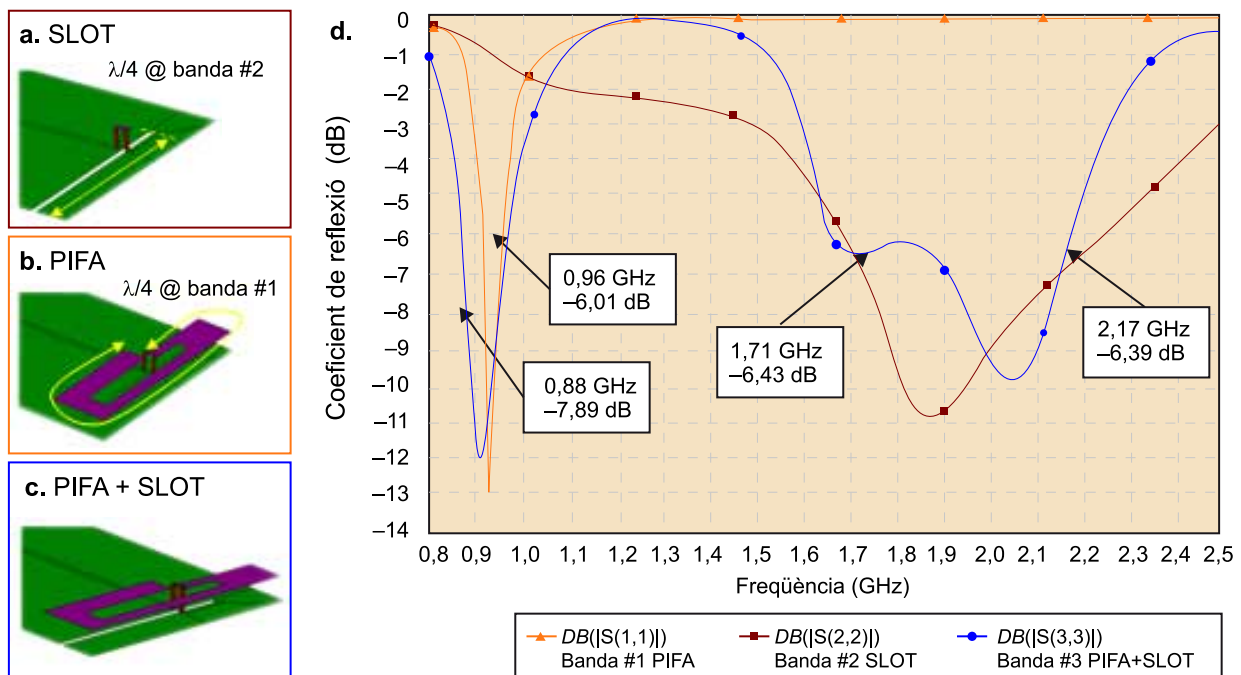
J. Anguera; C. Puente. "Shaped ground plane for radio apparatus". Sol·licitud de patent WO 2006/070017.

Lectura complementària

Sobre l'augment de l'amplada de banda, podeu consultar l'obra següent:

S. Kumar; L. Shafai; N. Jacob (2004). "Investigation of wide-band microstrip slot antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 52, núm. 3, pàg. 865-872).

Figura 19. Seqüència que mostra el concepte d'antena



a. Una ranura en el pla de massa està excitada en 1.900 MHz (banda #2); b. La PIFA està sintonitzada en 900 MHz (banda #1); c. Excitació en paral·lel de les dues antenes (PIFA + ranura); d. Coeficient de reflexió del sistema d'antena. El pla de massa és de 100 mm × 40 mm en tots els casos.

Com que la PIFA només té una branca, l'espai es pot reutilitzar per a situar-hi més branques i, per tant, augmentar el nombre de bandes. Per a aquesta tècnica, es pot concloure el següent:

- a) Nombre de bandes = nombre de bandes de la PIFA + nombre de bandes de ranura.
- b) Les bandes a causa de la PIFA i de la ranura es poden ajustar de manera independent.

Aquest concepte basat en una excitació en paral·lel d'un conjunt PIFA-ranura resulta especialment útil per al disseny d'antenes multibanda de telèfons mòbils, en què el nombre de bandes freqüencials de la solució proposada està determinat per la suma de les bandes que dona cada radiador. A més a més, aquestes bandes poden ser controlades independentment, cosa que afegeix un grau addicional de llibertat en el disseny.

Gràcies al radiador de ranura, el volum de la PIFA es pot reutilitzar per a afegir-hi més bandes. Amb aquesta estructura, una banda extra en S-DBM ha estat afegida finalment a un prototip pentabanda, que inclou GSM 900, 1800, 1900, UMTS i S-DMB. El volum total d'antena és de 39 mm × 11 mm × 2 mm d'altura. Els resultats per a l'eficiència total, tenint en compte diversos components (bateria, pantalla, altaveu, càmera i cobertes del telèfon), són satisfactoris i fan interessant aquest concepte per a la nova generació de telèfons de perfil baix i multibanda.

3.3.2. Arquitectures robustes a l'efecte de la mà

El desafiament per a la comunitat d'antenes consisteix a dissenyar antenes no solament multibanda i miniatura, sinó que també siguin robustes pel que fa a la interacció humana, és a dir, minimitzar la radiació cap al cos humà i aconseguir que el comportament de l'antena sigui independent, per exemple, de la càrrega de la mà, que desintonitza i absorbeix potència radiada.

Són diverses les tècniques que han aparegut en la literatura. En Jung (2007), dues tires estan situades a les vores de la PCB per a fer el sistema robust a l'efecte de càrrega de la mà. Alguns esquemes proposen la compensació de l'efecte del dit mitjançant la selecció d'antenes que requereixen un mecanisme de commutació (Valkonen i altres, 2010; Ilvonen i altres, 2011); és a dir, quan el dit bloqueja una antena, el sistema commuta a una altra antena que està lliure del bloqueig del dit. Aquest mecanisme de commutació implica un increment en el consum de la bateria.

Lectures complementàries

Sobre els efectes de la mà, podeu consultar les obres següents:

C. H. Li; E. Ofli; N. Chavannes; N. Kuster (2009). "Effects of hand phantom on mobile phone antenna performance". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pàg. 2763-2770).

W. Yu; S. Yang; C.-L. Tang; D. Tu (2010). "Accurate simulation of the radiation performance of a mobile slide phone in a hand-head position". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 52, pàg. 168-177).

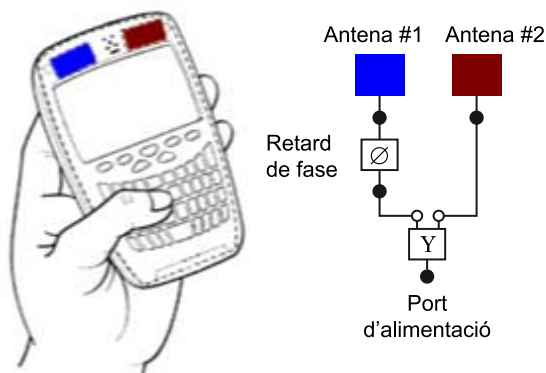
A continuació es mostra una tècnica per a proporcionar robustesa pel que fa a l'efecte de la mà, anomenada **sistema distribuït d'antenes**. La tècnica proposa una arquitectura basada en una agrupació de monopols miniatura disposats estratègicament al llarg d'una PCB amb la finalitat de proporcionar robustesa pel que fa a aquest efecte de càrrega humana, i en concret, a aquest efecte de càrrega del dit (figura 20).

És ben conegut a partir de la teoria de microones que una agrupació d'antenes en fase presenta la mateixa pèrdua de retorn en el port d'entrada del sistema d'alimentació que la pèrdua de retorn de l'element individual. No obstant això, si s'introdueix un retard de fase, per exemple per a aconseguir una certa inclinació de feix, l'amplada de banda pot ser millorada en el port d'entrada a causa de la suma no constructiva de totes les reflexions procedents de cada radiador. Aquest principi de teoria d'agrupacions s'aplica aquí a fi d'obtenir no solament una antena de banda ampla, sinó també un sistema més insensible a aquest efecte de càrrega del dit que el cas d'un sol element.

El sistema proposat és completament passiu i resulta considerablement avançatjós en termes de simplicitat i de consum de bateria.

S'han utilitzat models elèctrics per a fer una interpretació física en el mecanisme de banda ampla dels sistemes d'antenes distribuïdes.

Figura 20. Il·lustració d'un sistema d'antena distribuït amb dos elements col·locats en ubicacions diferents d'un terminal mòbil



Es construeixen un prototip que té un sol monopol, un altre prototip que comprèn dos monopols i un tercer que inclou tres monopols petits combinats en un sol port, i se'n mesuren les prestacions amb la finalitat de demostrar l'efectivitat de la proposta (figura 21). L'amplada de banda ($ROE \leq 3$) per al sistema amb tres monopols és més elevada que l'assolida pels altres prototips. L'amplada de banda és de 15,6%, 23,6% i 34% per al cas d'un monopol, de dos i de tres, respectivament. Cal assenyalar que els tres prototips poden operar en els serveis mòbils GSM 850 / GSM 900. A més a més, s'ha de tenir en compte que l'agrupació amb tres antenes opera també des de 700 MHz fins a 824 MHz,

Lectures complementàries

Sobre la tècnica del sistema distribuït d'antenes, podeu consultar les obres següents:

J. Anguera; C. Puente. "Distributed antenna system robust to human loading effects". Sol·licitud de patent WO 2007/141187.

J. Anguera; A. Andújar; Y. Cobo; C. Picher; C. Puente (2011). "Handset antenna array to mitigate the finger loading effect". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011* (pàg. 611-614). Roma (Itàlia).

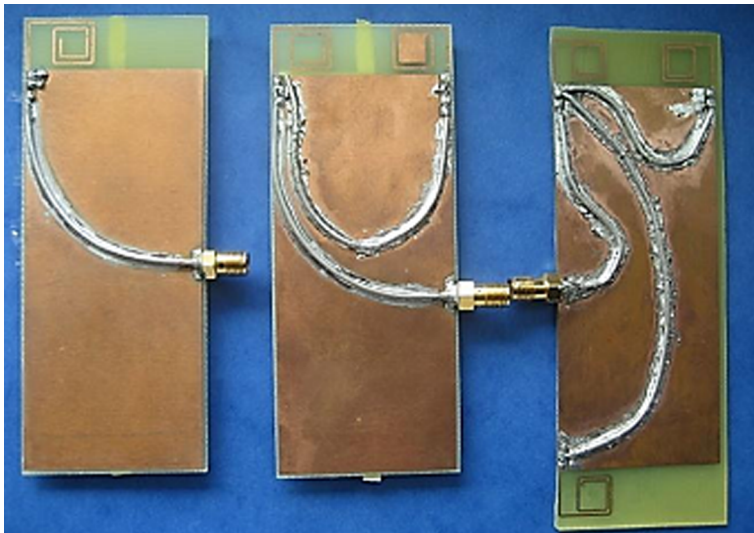
Lectura complementària

Sobre l'ús de models elèctrics per a fer una interpretació física en el mecanisme de banda ampla dels sistemes d'antenes distribuïdes, podeu consultar l'obra següent:

A. Andújar; J. Anguera; Y. Cobo; C. Picher (2012). "Distributed antenna systems for wireless handheld devices robust to hand loading". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 60, núm. 10, pàg. 4830-4837).

on ni l'agrupació de dos monopols ni el cas amb un sol monopol presenten un bon coeficient de reflexió. Això és especialment útil per a proporcionar funcionament en els estàndards de comunicació emergents, com LTE700.

Figura 21. Prototips fabricats



Esquerra: Monopol sol; centre: Agrupació de dos monopols; dreta: Agrupació de tres monopols. El pla de massa és de 90 mm x 40 mm imprès en un substrat de FR4 d'1 mm de gruix. Els monopols són de 13 mm x 11 mm.

Figura 22

a.



b.



a. Posició de subjecció comuna durant una trucada; b. La mà *phantom* emulant la situació real il·lustrada en l'apartat a.

Lectura complementària

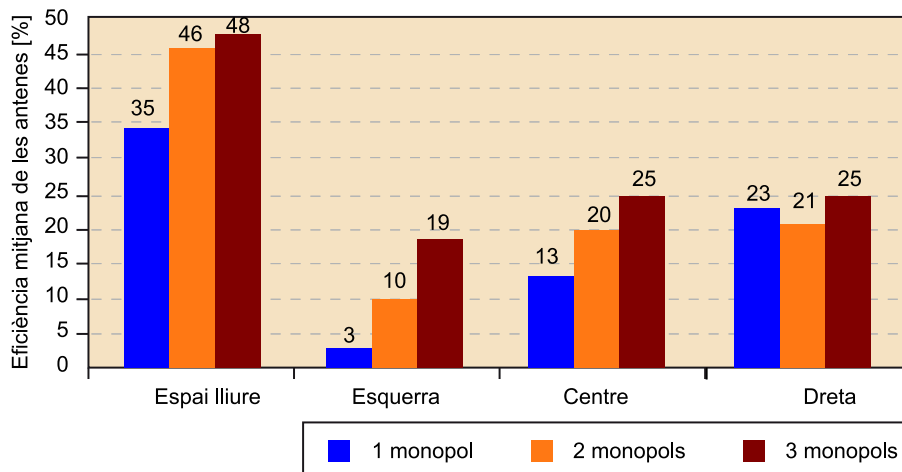
Sobre l'efectivitat de les propostes exposades en la figura 21, podeu consultar l'obra següent:

J. Anguera; A. Andújar; Y. Cobo; C. Picher; C. Puente (2011). "Handset antenna array to mitigate the finger loading effect". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011* (pàg. 611-614). Roma (Itàlia).

Per a determinar la robustesa de la càrrega humana s'utilitza una *phantom hand* (figura 22). La *phantom hand* és plena de líquids que emulen les propietats electromagnètiques de la mà humana en les freqüències d'interès. S'han dut a terme diferents experiments amb el dit situat a 1 mm de distància de l'antena considerant tres posicions: esquerra, central i dreta. El palmell de la mà està espaiat a 20 mm del pla de massa amb la finalitat de caracteritzar un escenari realista quan l'usuari sosté el telèfon. El mateix esquema s'utilitza per als tres monopols (el monopoli de la part inferior no pateix l'efecte de càrrega dit).

Per al cas del monopoli sol, la posició dreta és crítica, ja que el dit cobreix totalment l'antena, mentre que per a la posició esquerra el dit és lluny i és la més favorable (figura 23). Cal remarcar que aquests experiments consideren una situació crítica en què el dit està només 1 mm per sobre de l'antena.

Figura 23



Comparacions de l'eficiència d'antena mesurada a partir de la mitjana en 824-960 MHz en l'espai lliure i considerant la mà per als sistemes d'antena proposats en la figura 21 i pel que fa a les tres posicions del dit.

Per a l'agrupació de dos elements, l'eficiència és millor per a tots els casos excepte en la posició esquerra, en què l'única antena no experimenta l'efecte de dit, ja que està més allunyada. No obstant això, en el millor dels casos de l'antena única, l'eficiència d'antena per a l'únic monopoli i agrupació de dos elements és bastant comparable. L'avantatge de l'agrupació de dos elements es demostra per als altres casos, quan l'eficiència està per sobre de l'eficiència de l'únic monopoli.

Per a l'agrupació de tres elements, els avantatges són encara més remarcables, ja que presenta els millors resultats entre els tres prototips. Per exemple, en el cas de la dreta, l'eficiència en el rang de freqüència de 824-960 MHz és 2,5 dB més alta que en l'agrupació de dos elements i 7,9 dB més alta que en el cas de l'únic monopoli, cosa que demostra que aquesta tècnica és útil per a mitigar la caiguda de l'eficiència a causa de la càrrega del dit, que està directament relacionada amb una disminució de la durada de la bateria, la disminució de la cobertura i en alguns casos amb un tall en la comunicació.

Lectura complementària

Sobre les propietats electromagnètiques de la mà humana, podeu consultar l'obra següent:

"Basic standard for the measurement of specific absorption rate related to human exposure to electromagnetic fields from mobile phones (300 MHz - 3 GHz)". J, CENELEC-European Committee for Electrotechnical Standardization Std. EN 50 361 (2001, juliol).

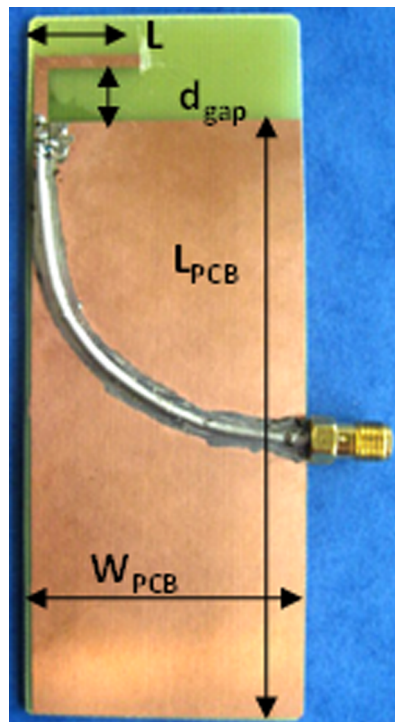
S'ha descrit un sistema d'antena distribuïda utilitzant tres monopols miniatra amb una amplada de banda suficient per a cobrir els estàndards de comunicació en l'interval de 686 MHz a 970 MHz. Aquest concepte utilitza una agrupació de monopols amb un desfasament adequat entre ells per a millorar l'amplada de banda en comparació d'un sol monopol. A més a més, el sistema proposat és robust pel que fa a l'efecte de càrrega de la mà perquè quan una antena és interferida pel dit, hi ha encara dues antenes més que contribueixen eficientment a la radiació. Finalment, s'ha d'emfatitzar que el sistema proposat distribuït és completament passiu, i és avantatjós en termes de simplicitat i consum de bateria.

3.3.3. Xarxes d'adaptació

En combinació amb tècniques d'antena, les xarxes d'adaptació exerceixen un paper important no solament en la ubicació de la banda freqüencial d'operació, sinó també en alguns casos per a proporcionar una amplada de banda més gran.

Es presenta una tècnica que consisteix en un circuit simple amb l'objectiu de millorar l'amplada de banda d'una antena simple per un factor de 2,45 vegades, aproximadament, per a $ROE = 3$.

Figura 24. Monopol en forma de L imprès en una PCB



Les dimensions de l'antena monopolar són $L = 23$ mm amb una amplada de pista de 2 mm i està localitzada a la vora més curta d'una PCB en una distància $d_{gap} = 4$ mm de la vora del pla de massa. Les dimensions del pla de massa són $L_{PCB} = 90$ mm i $W_{PCB} = 40$ mm.

Lectures complementàries

Sobre les xarxes d'adaptació, podeu consultar les obres següents:

J. S. Lee; G. C. Kang; B. Jung; W. Jung; M. J. Park; S. H. Han; F. J. Harackiewicz; B. Lee (2005). "Triple band internal antenna using matching circuits". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (vol. 1A, pàg. 442-445).

Y. Li; T. Cantin; B. Derat; D. Pasquet; J. C. Bolomey (2007). "Application of resonant matching circuits for simultaneously enhancing the bandwidth of multi-band mobile phones". *International Workshop Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*. IWAT '07 (pàg. 479-482).

Sobre la tècnica que hem presentat aquí:

J. Anguera; C. Puente; C. Borja; G. Font; J. Soler (2001). "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 31, núm. 3, pàg. 185-188).

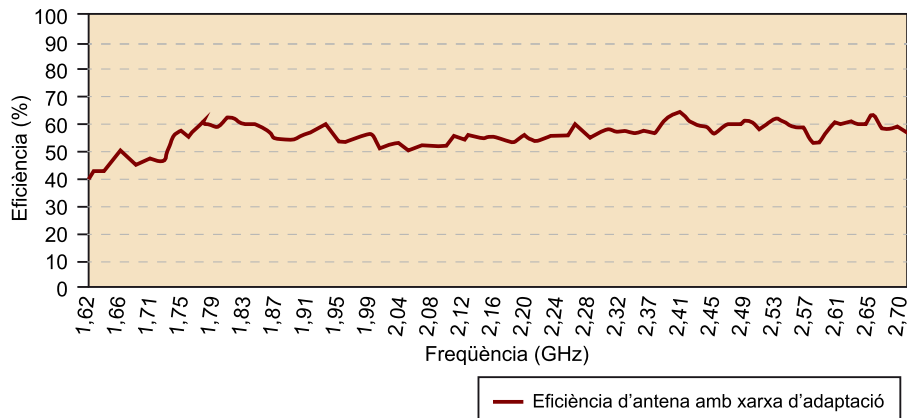
A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2010). "A systematic method to design broadband matching networks". *European Conference on Antennas and Propagation – EuCAP 2010*. Barcelona (Espanya).

A. Andújar; J. Anguera (2012). "Adaptació d'antenes i factor de qualitat". *Antenes*. Barcelona: UOC.

Xarxes d'adaptació amb components concentrats són àmpliament utilitzades en molts terminals mòbils comercials. En algunes situacions, l'ús d'una xarxa d'adaptació ajuda a ajustar les bandes de funcionament. A continuació s'il·lustra una tècnica per a ampliar l'amplada de banda inherent d'una antena per a terminals mòbils. Bàsicament, la tècnica consisteix en l'addició d'un circuit ressonant LC que permet la creació d'un bucle d'impedància de mida adequada per a ser inscrit a l'interior del cercle d'una *ROE* objectiu donada.

Mitjançant l'anàlisi circuital es demostra que l'amplada de banda d'una antena amb una impedància d'entrada similar a la produïda per un circuit RLC en sèrie al voltant de la freqüència central de funcionament es pot millorar mitjançant un factor teòric de 2,45 respecte d'una *ROE* = 3. Per a demostrar el potencial d'aquesta tècnica, una antena monopòl en forma de L amb una impedància d'entrada semblant a un circuit RLC en sèrie al llarg de la freqüència central d'operació s'adapta amb una xarxa de banda ampla (figura 24). Les mesures d'amplada de banda i l'eficiència demostren que aquest únic element de dimensions reduïdes pot ser operatiu en GSM 1800, GSM 1900, UMTS, LTE 2100, LTE 2300 i LTE 2500 (figura 25).

Figura 25. Mesura de l'eficiència d'antena del monopòl en L que es mostra en la figura 24



La xarxa de banda ampla consta de $L = 3,3$ nH i $C = 1,3$ pF, tots dos en paral·lel.

Els diagrames de radiació mesurats són estables en el rang de freqüències d'operació i presenten un caràcter omnidireccional amb un mínim al llarg de l'eix llarg de la PCB. Les directivitats mesurades varien des de 2,8 fins a 4,4 dB. Com a resultat d'això, amb el circuit ressonant LC s'aconsegueix un augment de l'amplada de banda d'almenys una meitat del límit de Fano. Com a exemple pràctic, un monopòl amb una BW_0 inherent de 14,2% $ROE \leq 3$ ha estat millorat per a assolir una BW_F de 52,4% $ROE \leq 3$ amb una eficiència d'antena mesurada a partir de la mitjana en el marge de 1.710 MHz a 2.690 MHz de 56,5%.

Lectura complementària

Podeu consultar la demostració esmentada en l'obra següent:

A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2010). "A systematic method to design broadband matching networks". *European Conference on Antennas and Propagation – EuCAP 2010*. Barcelona (Espanya).

Lectura complementària

Sobre el límit de Fano, podeu consultar l'obra següent:

R. M. Fano (1950). "Theoretical limitations on the broad-band matching of arbitrary impedances". *Journal of the Franklin Institute* (vol. 249, pàg. 57-83, gener 1950, i pàg. 139-154, febrer 1950).

En conclusió, les xarxes d'adaptació, i en concret la xarxa de banda ampla proposada, permeten augmentar l'amplada de banda d'antenes sense la necessitat d'incrementar la mida de l'antena.

3.3.4. Intel·ligència en el pla de massa

Els esforços en el disseny de l'antena s'han adreçat principalment a la geometria de l'antena i no al pla de massa, ja que s'ha subestimat la rellevància que té en el procés de radiació. En conseqüència, l'element d'antena normalment era un element autorresonant, que proporciona una radiació eficient amb independència de l'estructura del pla de massa. No obstant això, el pla de massa ha adquirit importància de manera progressiva, ja que diversos estudis han demostrat la contribució que fa a les propietats de la radiació.

Les futures generacions de telèfons mòbils necessitaran operar en el màxim nombre de bandes de freqüència que sigui possible, com LTE 700, GSM 850, GSM 900, GSM 1800, GSM 1900, UMTS, LTE 2100, LTE 2300, LTE 2500, entre d'altres. S'ha demostrat que una longitud de pla de massa de $0,4\lambda$ suporta un mode eficient en aquest i millora l'amplada de banda i l'eficiència quan aquest mode s'excita correctament.

Per tant, el disseny de l'antena es determina principalment per les dimensions de la PCB, que es fixen per la mida del dispositiu portàtil sense fil. Una limitació important és l'altura de l'antena, que ha de ser prou petita per a permetre la generació emergent de telèfons amb perfils primis. D'altra banda, aquests nous telèfons mòbils incorporen també un nombre de serveis addicionals, com càmeres de vídeo, pantalles grans per a veure la televisió i diversos altaveus d'àudio d'alta fidelitat que contribueixen de manera no volguda a la reducció de l'espai disponible per a situar-hi l'antena. Per tant, es necessiten noves tècniques a fi d'aconseguir el màxim rendiment amb una antena que ocupi el mínim espai possible. A continuació es revisen tres tècniques per a manipular el pla de massa:

- L'ús de la ranura per a allargar el pla de massa.
- L'ús d'una tira conductora per a allargar el pla de massa.
- L'ús d'*stubs* (estubs) per a reduir elèctricament el pla de massa.

Ús de ranures en el pla de massa

Per a ampliar eficaçment el pla de massa, es poden utilitzar ranures. La idea s'il·lustra en la figura 26, on es fa servir la ranura per a ajustar el mode de pla de massa (ampliació de la trajectòria del corrent) a la regió de baixa freqüència

Lectures complementàries

Sobre la contribució del pla de massa a la radiació, podeu consultar les obres següents:

T. Y. Wu; K. L. Wong (2002). "On the impedance bandwidth of a planar inverted-F antenna for mobile handsets". *Microwave Opt. Tech. Lett.* (vol. 32, pàg. 249-251).

J. Anguera; I. Sanz; A. Sanz; T. Condes; D. Gala; C. Puente; J. Soler (2006). "Enhancing the performance of handset antennas by means of groundplane design". *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials (iWAT 2006)*. Nova York (EUA).

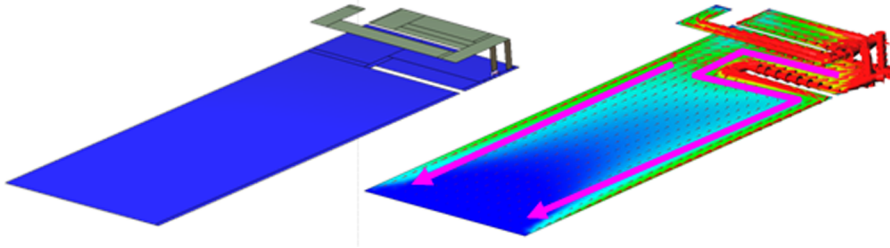
Lectura complementària

Sobre els efectes del pla de massa, podeu consultar l'obra següent:

K. L. Wong (2003). "Planar antennas for wireless communications". Wiley Inter-Science.

(900 MHz) i al mateix temps es col·loca la ranura sota la zona de l'antena perquè actuï com un element paràsit a freqüències més altes (1.800-2.100 MHz) i així s'augmenti l'amplada de banda seguint el principi d'element alimentat - element paràsit, com el que s'ha descrit en el cas dels monopols acoblats.

Figura 26. Introducció de ranures en el pla de massa per a allargar elèctricament el camí dels corrents



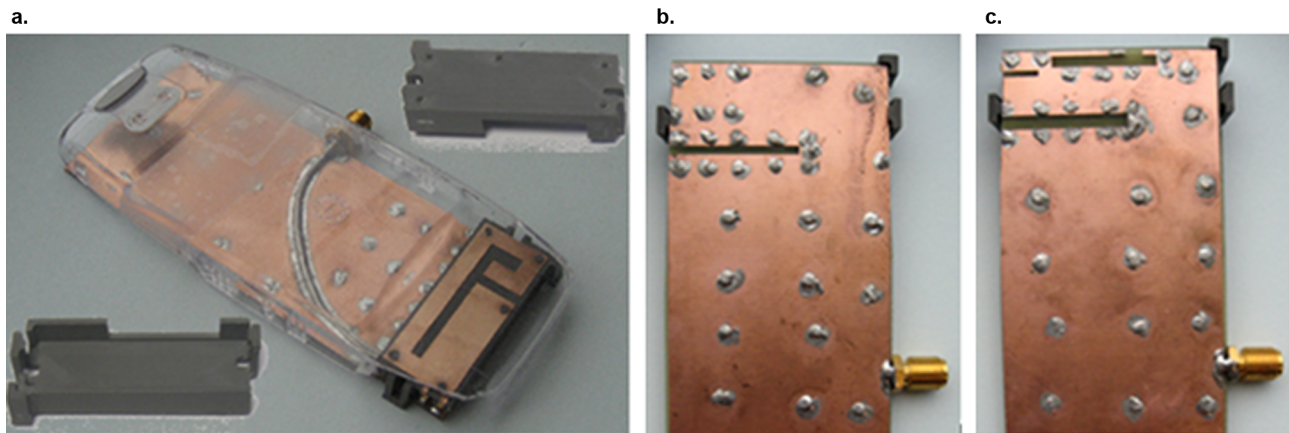
Les fletxes contínues són una representació qualitativa de la distribució per a 900 MHz, que està distribuïda al llarg dels marges llargs de la PCB. PCB de 100 mm x 40 mm.

A continuació s'estudien tres antenes PIFA; concretament, una PIFA de doble banda sense ranures, una PIFA de quatre bandes amb una ranura i la PIFA proposta hexabanda amb múltiples ranures en el pla de massa (figura 27). El programari de simulació IE3D basat en el mètode dels moments s'utilitza per a l'optimització dels paràmetres de disseny.

Vegeu també

El mètode dels moments s'estudia en l'apartat 3 del mòdul "Mètodes numèrics per a la resolució de les equacions de Maxwell" d'aquesta assignatura.

Figura 27. Prototips fabricats



a. PIFA de doble banda i vista posterior; b. PIFA de quatre bandes; c. PIFA hexabanda. En l'apartat a es mostra el plàstic que subjecta l'antena.

Lectura complementària

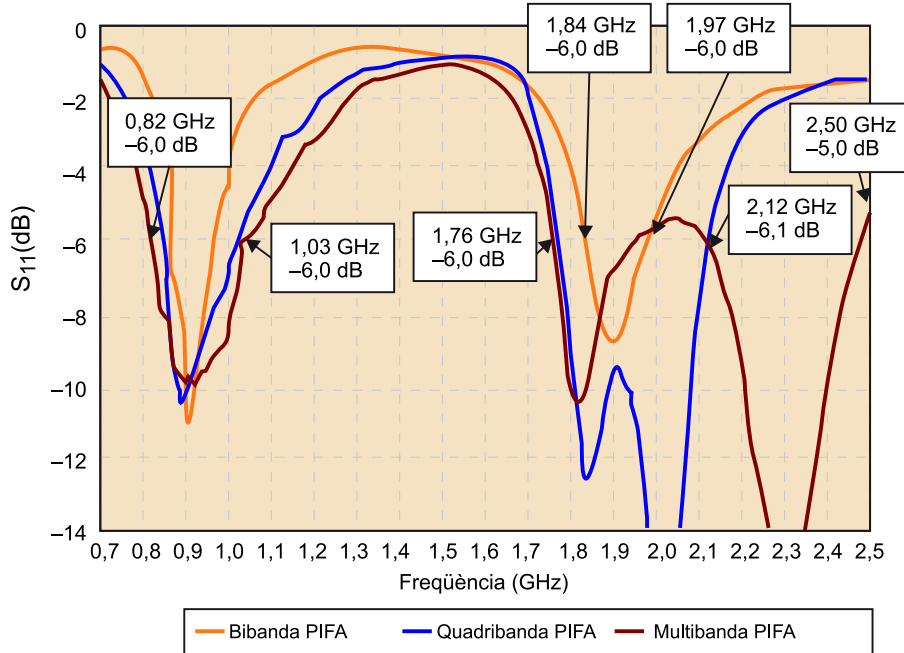
Sobre les tres antenes PIFA que es representen en la figura 27, podeu consultar l'obra següent:

A. Cabedo; J. Anguera; C. Picher; M. Ribó; C. Puente (2009). "Multi-band handset antenna combining a PIFA, slots, and ground plane modes". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pàg. 2526-2533).

En aquest concepte, un pla de massa ranurat s'utilitza per a millorar l'amplada de banda en les dues regions de baixa i alta freqüència sense augmentar el volum de l'antena. D'una banda, a baixes freqüències, la ranura està per sota de la ressonància, però permet que el mode de pla de massa pugui ser excitat amb la finalitat d'augmentar l'amplada de banda a baixes freqüències; d'altra banda, les ranures són comparables a $\lambda/4$ a altes freqüències, i per tant milloren

l'amplada de banda a causa de l'acoblament que existeix amb la PIFA (figura 28). Aquesta solució no excita directament les ranures, com en el cas de PIFA i les ranures, sinó per l'acoblament PIFA (l'element actiu) i la mateixa ranura que actua de paràsit.

Figura 28. Mesura del coeficient de reflexió per als tres prototips que s'estudien



S'observa que el disseny amb diverses ranures opera almenys en GSM 850/900/1800/1900, UMTS i Bluetooth.

La col·locació d'un component (altaveu) sobre la ranura (sense cap contacte metàl·lic entre l'altaveu i el pla de massa) no afecta el rendiment de l'antena en les freqüències baixes. No obstant això, és crític a altes freqüències quan el component és a prop de l'extrem obert de la ranura. L'efecte es minimitza al centre i a l'extrem curt de la ranura. A més a més, la SAR ha estat avaluada per a aquest concepte i els que utilitzen ranures en el pla de massa. Els resultats mostren que aquest concepte presenta una SAR similar a la de la PIFA en la PCB sense ranures amb l'avantatge que es cobreixen més bandes amb la solució de pla de massa ranurat.

Aquest nou disseny ha estat comparat amb el mateix disseny sense les ranures. Els resultats mostren que l'amplada de banda, i en conseqüència l'eficiència total, es millora, de manera que s'obté un radiador útil per a aplicacions de telèfons mòbils multibanda.

Allargar el pla de massa mitjançant tires conductores

Com s'ha esmentat anteriorment, el pla de massa exerceix un paper important en el comportament electromagnètic d'una antena integrada en un dispositiu portàtil com un telèfon mòbil. La tècnica següent utilitza una tira conductora en el pla de massa per a produir eficaçment un allargament del pla de massa

Vegeu també

El cas de PIFA i les ranures s'explica en el subapartat 3.1.1 d'aquest mòdul didàctic.

Lectures complementàries

Sobre l'efecte de la col·locació d'un component sobre la ranura, podeu consultar l'obra següent:

A. Cabedo; J. Anguera; C. Picher; M. Ribó; C. Puente (2009). "Multi-band handset antenna combining a PIFA, slots, and ground plane modes". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pàg. 2526-2533).

Sobre la solució de pla de massa ranurat, podeu consultar l'obra següent:

C. Picher; J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; S. Kahng (2012). "Analysis of the human head interaction in handset antennas with slotted ground planes". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 54, núm. 2, pàg.36-56).

capaç de sintonitzar la freqüència de ressonància del mode fonamental a valors propers a 900 MHz, la freqüència central en què se situen alguns estàndards de comunicacions mòbils (figura 29).

Bàsicament, per a emular que el pla de massa sigui més llarg, s'utilitza una tira conductora en el pla de massa al llarg del marge oposat a la ubicació de l'antena. Aquesta tira està dissenyada per a ajustar el mode de pla de massa (Anguera, Andújar i Puente, 2011). Com a resultat d'això, l'amplada de banda i l'eficiència s'incrementen. La longitud de la tira pot ser reduïda per una càrrega inductiva o una càrrega dielèctrica seguint el principi de miniaturització que s'utilitza en antenes elèctricament petites. Per a una percepció física més bona del principi de funcionament s'empren models elèctrics i anàlisis de la secció transversal radar o RCS (*radar cross section*).

Altres autors han utilitzat la tira per a mitigar l'efecte de càrrega de la mà (Jung i altres, 2007). A Holopainen i altres (2009), un mecanisme de control de camp proper elèctric i magnètic s'utilitza per a la compatibilitat amb audiodfons (HAC).

Per a oferir una perspectiva més bona de la millora de l'eficiència, se seleccionen quatre casos (figura 29): sense tires, amb tira, amb la longitud de la tira que té 48 mm i 23 mm, i amb l'inductor de càrrega respectiu en cada cas. D'una banda, es mostra clarament que l'eficiència es millora a la regió de baixa freqüència (figura 30). La tira sense càrrega i amb càrrega inductiva té 48 mm de longitud i resulta molt similar demostrar-ne el benefici de la inductància de càrrega. El cas de 23 mm millora l'eficiència de pic, però l'eficiència disminueix a 960 MHz. En resum, la tira amb una longitud de 48 mm millora l'eficiència en tota la banda. En concret, la millora en 960 MHz és molt significativa: 3,5 dB. D'altra banda, la tira no altera el rendiment a la regió d'alta freqüència.

Lectures complementàries

Sobre mecanismes per a allargar el pla de massa, podeu consultar l'obra següent:

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente (2011). "A mechanism to electrically enlarge the ground plane of handset antennas: a bandwidth enhancement technique". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 53, núm. 7, pàg. 1512-1517).

Sobre l'anàlisi RCS, podeu consultar:

J. Anguera; A. Andújar (2012). "Ground plane contribution in wireless handheld devices using radar cross section analysis". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 26, pàg. 101-114).

Vegeu també

Podeu veure les regulacions HAC en el subapartat 1.4 d'aquest mòdul didàctic.

Figura 30. Eficiència d'antena mesurada sense la tira i amb la tira que considera una càrrega inductiva per al cas que es mostra en la figura 29

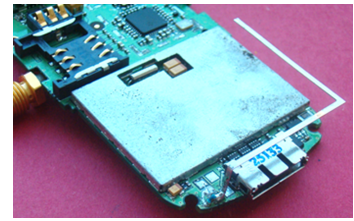
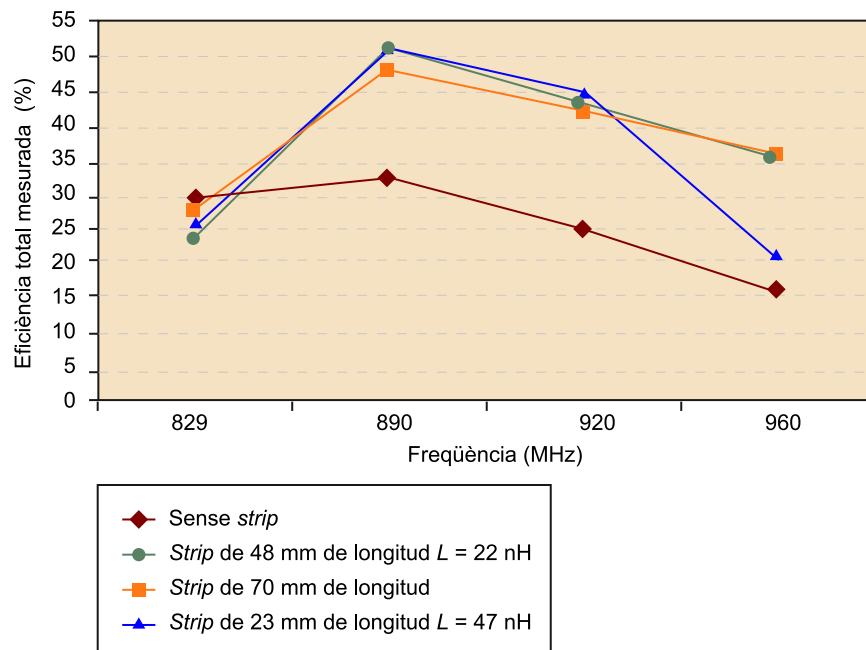


Figura 29. Tira conductora en un telèfon real

El cas amb una L de 22 nH i 48 mm de longitud millora l'eficiència eficaçment per mitjà de la banda de 820-960 MHz.

En conclusió, aquesta tècnica és útil per a millorar l'amplada de banda i l'eficiència a la regió de baixa freqüència, quan la longitud del pla de massa és inferior a $0,4\lambda$, que és aproximadament la longitud òptima per a excitar el mode fonamental del pla de massa, i per tant per a maximitzar l'amplada de banda i l'eficiència.

Reducció del pla de massa mitjançant stubs

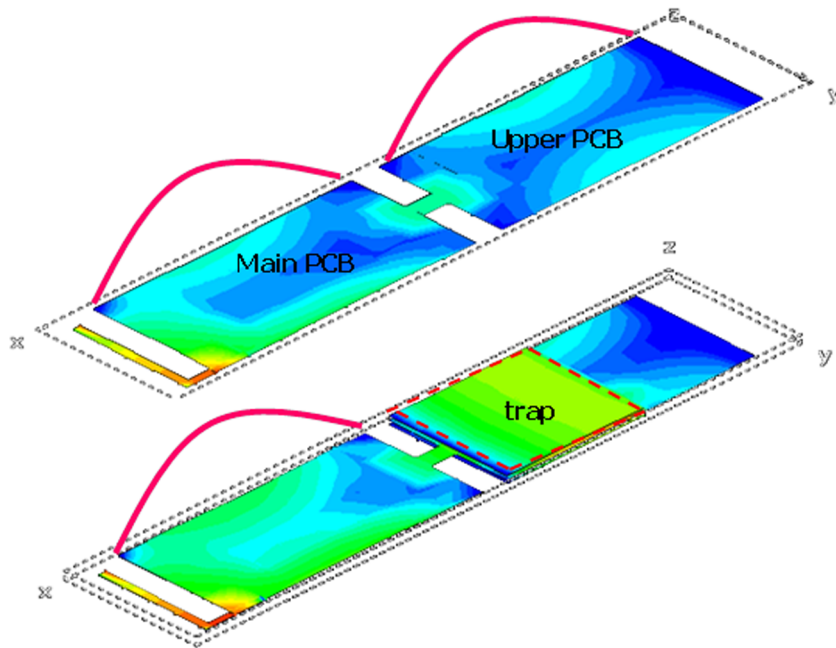
En algunes plataformes, com per exemple els terminals de tipus *clamshell*, el pla de massa és elèctricament gran en posició oberta. D'altra banda, si l'antena es col·loca en un marge en comptes de fer-ho en la frontissa, que pot excitar un mode particular, es converteix en un diagrama de radiació amb molts lòbuls i un mínim en el pla horitzontal, fet que pot repercutir en la recepció correcta del senyal provinent de l'estació base. En aquest sentit, la present tècnica consisteix en la reducció de la longitud elèctrica del pla de massa mitjançant l'addició d'un *stub* (figura 31).

Lectura complementària

Sobre la tècnica d'addició d'un *stub*, podeu consultar l'obra següent:

J. Anguera; C. Puente.
"Handset with electromagnetic bra". Sol·licitud de patent WO 2005/083833.

Figura 31. Simulació de la distribució de corrent en 1,82 GHz sense i amb un mecanisme d'escurçament que consta d'una placa de $\lambda/4$ en 1,82 GHz



La línia contínua és una aproximació qualitativa dels corrents en el pla de massa. Per al cas superior, s'excita un mode actual amb dos sinusoides que dona lloc a un diagrama amb diversos lòbuls. Per al cas inferior, el corrent de la PCB superior ha estat mitgat a causa de la placa de $\lambda/4$.

A Lindberg i Öjefors (2006), la tècnica d'emprar *stubs* augmenta l'amplada de banda a la regió d'alta freqüència. Efectivament, a aquesta freqüència, una longitud típica d'un telèfon del tipus de barra de 100 mm és $0,63\lambda_0$ a 1.900 MHz, que és més gran que $0,4\lambda_0$. Per tant, l'*stub* força que el pla de massa sigui de $0,4\lambda_0$ de longitud a aquestes freqüències. Es poden obtenir uns efectes semblants mitjançant la introducció d'una ranura en el pla de massa.

Quan l'antena es col·loca en una vora d'una plataforma plegable, la radiació en el pla horitzontal no presenta un màxim de radiació a causa d'un diagrama multilòbul. Mitjançant l'addició d'un *stub* que ofereix una impedància de circuit obert a la longitud $\lambda/4$ a la freqüència central de funcionament, el corrent es bloqueja a causa de l'alta impedància de l'*stub*. D'aquesta manera, el corrent es redueix en el tram de pla de massa que segueix l'*stub*. Com a resultat d'això, el mode d'ordre superior s'ha eliminat en el pla de massa, i ara suporta el mode fonamental, que radia amb un màxim en el pla horitzontal, cosa que és una situació desitjable.

3.3.5. Tecnologia basada en excitació del pla de massa

Els fabricants de terminals mòbils consideren el volum dedicat a la integració de l'estructura radiant, i en concret l'element d'antena, com un peatge que s'ha de pagar amb la finalitat de proporcionar capacitats sense fils per a terminals mòbils.

Lectura complementària

Sobre la introducció d'*stubs* en el pla de massa, podeu consultar l'obra següent:
C. T. Lee; K. L Wong (2009). "Internal WWAN clamshell mobile phone antenna using a current trap for reduced ground plane effects". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* (vol. 57, núm. 10, pàg. 3303-3308).

La nova tecnologia que es presenta a continuació, proposada pels autors d'aquesta obra i per altres inventors, proporciona elements molt compactes, fàcils d'integrar i que poden ser utilitzats com a elements estàndard.

Aquesta tècnica es basa a utilitzar el pla de massa com el radiador principal. Un element no ressonant en la banda d'interès també anomenat *excitador del pla de massa (ground plane booster)* és l'encarregat d'excitar correctament els modes de radiació eficients en el pla de massa inherent a les plataformes de terminals mòbils.

Una ubicació adequada, juntament amb un sistema de radiofreqüència, permet un funcionament multibanda amb dimensions petites (per exemple, tan sols 250 mm³ per a obtenir un rendiment multibanda en GSM 850, 900, 1800, 1900 i UMTS i diversos elements estàndard d'LTE), amb la qual cosa la nova arquitectura resulta especialment atractiva per als terminals mòbils multifunció emergents. A manera d'ordre de magnitud, aquesta tècnica comporta una reducció en un factor deu del volum de les antenes com PIFA i monopols que s'utilitzen en els terminals mòbils.

Altres tècniques compactes diferents també han aparegut en la literatura. A Villanen i altres (2006) es presenten dues estructures d'antena tenint en compte elements d'acoblament dissenyades per a transferir energia al mode eficient del pla de massa. Estan destinats a cobrir els estàndards de comunicació de GSM 900 i GSM 1800 de manera separada per mitjà d'un circuit d'adaptació amb elements distribuïts.

Una altra referència sobre elements d'acoblament es recull a Ozden i altres (2007), on es proposa una estructura d'antena consistent en dos elements d'acoblament i dos circuits ressonants. La proposta aconsegueix un comportament tetrabanda. No obstant això, els elements d'acoblament que s'han presentat per a cobrir cada regió de freqüència (624 mm³ i 64 mm³ respectivament), i especialment l'encarregat de proporcionar operació a la regió de baixa freqüència, encara presenten un volum considerable en comparació dels 250 mm³ amb la tecnologia que hem presentat aquí per a proporcionar operació en diverses bandes de 2G, 3G i 4G.

Lectures complementàries

J. Villanen; J. Ollikainen; O. Kivekäs; P. Vainikainen (2006). "Coupling element based mobile terminal antenna structures". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 7, pàg. 2142-2153).

S. Ozden; B. K. Nielsen; C. H. Jorgensen; J. Villanen; C. Icheln; P. Vainikainen (2007). "Quad-band coupling element antenna structure". Sol·licitud de patent U.S. 7,274,340 (25 de setembre).

Lectures complementàries

Sobre la nova tecnologia que es presenta a continuació, podeu consultar les obres següents:

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; J. Mumbrú (2009). "Antennaless wireless device". Sol·licitud de patent WO2010/015365 (31 de juliol).

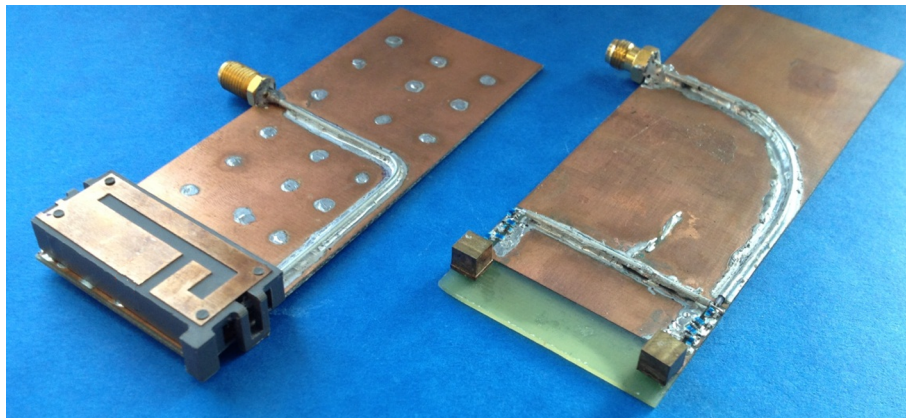
J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; J. Mumbrú (2009). "Antennaless wireless device capable of operation in multiple frequency regions". Sol·licitud de patent WO2010/015364, 31 de juliol.

A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2011). "Ground plane boosters as a compact antenna technology for wireless handheld devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 59, núm. 5, pàg. 1668-1677).

A. Andújar; J. Anguera (2013). "Magnetic boosters for multi-band operation". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 55, núm. 1, pàg. 65-75).

En relació amb els elements no ressonants, el comportament multibanda s'aconsegueix per mitjà de dos elements de tan sols $5\text{ mm} \times 5\text{ mm} \times 5\text{ mm}$ i dues xarxes d'adaptació capaces de proporcionar funcionament multibanda a cada regió de freqüència (figura 32).

Figura 32. Comparació d'una PIFA i la solució basada en excitadors del pla de massa per a operar en GSM 850/900/1800/1900 i UMTS



El volum de la PIFA és de 4.600 mm^3 , mentre que la solució compacta és només de 250 mm^3 .

Un dispositiu sense fil que emprava elements molt petits seria avantatjós, ja que permetria realitzar amb més facilitat la integració de l'estructura radiant en el dispositiu sense fil. El volum alliberat per l'absència de l'element d'antena permetria que els terminals mòbils fossin més primers, o fins i tot adoptar factors de formes radicalment noves que actualment no són factibles a causa de la presència d'un element d'antena. A més a més, si s'elimina precisament l'element que requereix disseny fet a mesura, s'obté una solució estàndard que només requereix ajustos menors per a ser implementat en diferents terminals mòbils.

En conseqüència, aquesta solució reemplaça l'element d'antena autorressonant per elements no ressonants (figura 33). La present tècnica se centra a proporcionar comportament multibanda a través de l'excitació adequada del pla de massa sense la necessitat d'un element d'antena. Aquesta tècnica demostra que no cal antena per a excitar els modes de radiació del pla de massa. L'arquitectura nova introduïda aquí només requereix elements no ressonants caracteritzats per un **factor de qualitat** elevat ($Q \approx 2.250$ per a la regió de baixa freqüència i $Q \approx 265$ per a la regió d'alta freqüència) i amb propietats de radiació extremament pobres per si mateixes, en combinació amb una xarxa d'adaptació per a proporcionar operativitat simultània en els estàndards de comunicació principals (GSM 850/900/1800/1900 i UMTS).

Vegeu també

Les xarxes d'adaptació contenen xarxes de banda ampla com les que s'han descrit en el subapartat 3.3.3 d'aquest mòdul didàctic.

Lectura complementària

Sobre el comportament multibanda dels elements no ressonants, podeu consultar la obra següent:

J. Anguera; A. Andújar; C. Puente; J. Mumbrú (2009). "Antennaless wireless device capable of operation in multiple frequency regions". Sol·licitud de patent WO2010/015364, 31 de juliol.

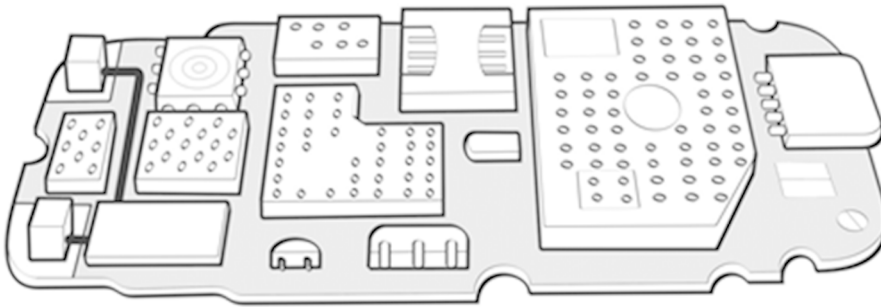
A. Andújar; J. Anguera; C. Puente (2011). "Ground plane boosters as a compact antenna technology for wireless handheld devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 59, núm. 5, pàg. 1668-1677).

Lectura complementària

Sobre el factor Q, podeu consultar:

A. Andújar; J. Anguera (2012). "Adaptació d'antenes i factor de qualitat". *Antenes*. Barcelona: UOC.

Figura 33. Esquema d'un terminal mòbil que inclou dos excitadors del pla de massa

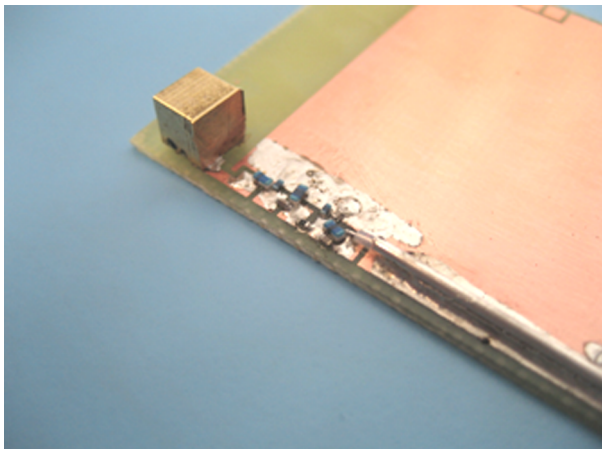


L'excitació adequada del mode predominant no és suficient per a proporcionar un comportament pentabanda i es necessita una xarxa d'adaptació amb la finalitat de garantir l'operació en els estàndards de comunicació que hem esmentat abans. Per al present exemple, cadascun dels elements no resonants utilitza una reactància per a anul·lar l'alta component reactiva de l'excitador del pla de massa i una xarxa de banda ampla com les que ja hem descrit per a aconseguir prou amplada de banda a fi de cobrir els estàndards requerits (figura 34). També s'empra un combinador per a convertir la solució de dos ports en una sola entrada o sortida (figura 35).

Vegeu també

Les xarxes d'adaptació de banda ampla es descriuen en el subapartat 3.3.3 d'aquest mòdul didàctic.

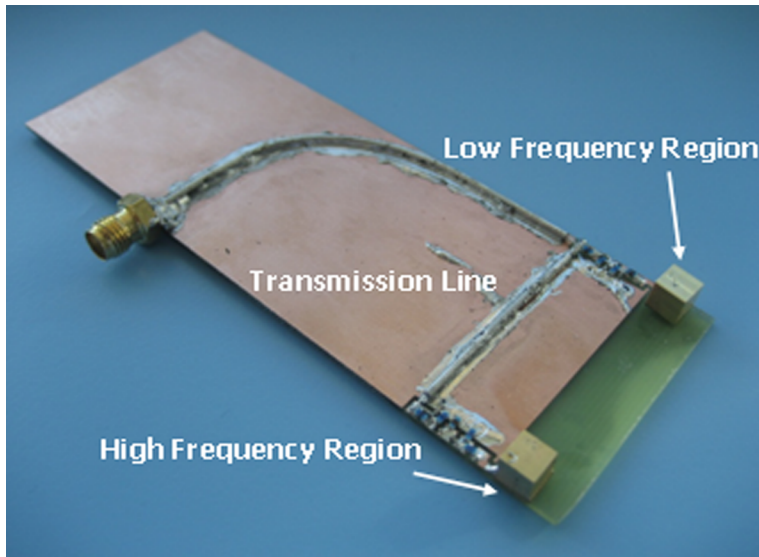
Figura 34. Prototip que inclou l'element no resonant i el sistema de radiofreqüència



En aquest sentit, les antenes com PIFA i monopòl utilitzades en els terminals mòbils que es caracteritzen per un volum considerable ($\approx 2.000-4.000 \text{ mm}^3$) podrien ser substituïdes per dos elements no resonants de baix volum (250 mm^3) i una topologia de xarxa amb un disseny sistemàtic. Aquests elements tenen com a missió excitar correctament el mode de radiació eficient del pla de massa, que presenta una alta eficiència de radiació i un Q baix en les freqüències d'interès, especialment a la regió de baixa freqüència (GSM 850/900). El disseny de la xarxa d'adaptació sistemàtica permet l'operativitat a les regions de freqüència volgudes. La contribució de la radiació proporcionada per aquests elements no resonants és insignificant i no s'han de considerar antenes. En conseqüència, la seva integració en plataformes portàtils elimina la necessitat d'incloure una antena dedicada en el terminal mòbil.

Els efectes de l'absorció del cap i la SAR s'han comparat amb altres tecnologies com PIFA utilitzant ranures en el pla de massa i els monopols acoblats que s'han presentat en aquest mòdul, i ha donat lloc a una tècnica més robusta pel que fa a l'efecte del cap.

Figura 35. Prototip pentabanda que opera en una regió baixa de freqüències que cobreix GSM 850/900 i una regió alta de freqüències que comprèn GSM 1800/1900 i UMTS



La solució es combina en un sol port mitjançant filtres.

Aquesta proposta esdevé una alternativa a la tecnologia actual d'antenes i apareix com una solució estàndard prometedora per a la integració en terminals mòbils multifuncionals emergents, on l'espai disponible en les plataformes de telèfons mòbils per a la integració de noves funcionalitats s'incrementa encara més, mentre que el rendiment de radiació es conserva. Els nous avenços en aquest camp mostren la possibilitat d'afegir-hi noves bandes, com LTE700 o LTE2100/2300/2500.

Lectura complementària

Sobre aquesta qüestió, podeu consultar l'obra següent:

A. Andújar; J. Anguera; C. Picher; C. Puente (2012). "Ground plane booster antenna technology. Human head interaction: Functional and biological analysis". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012*. Praga (República Txeca).

Lectures complementàries

Sobre els nous avenços en aquest camp, podeu consultar les obres següents:

A. Andújar; J. Anguera (2012). "On the radiofrequency system of ground plane booster antenna technology". *Electronics Letters* (vol. 48, núm. 14, pàg. 815-817).

J. Anguera; A. Andújar; C. García (2013). "Multiband and small coplanar antenna system for wireless handheld devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 61, núm. 7, pàg. 3782-3789).

Resum

L'aparició de nous sistemes de comunicació sense fils amb noves plataformes provoca que el disseny de l'antena sigui un repte difícil; d'una banda, es necessiten més antenes per a operar en noves bandes, i, de l'altra, les antenes requereixen un funcionament multibanda i tenir unes dimensions reduïdes per a ser integrades en els terminals mòbils.

La caracterització de les antenes és tan important com el seu disseny. Les antenes integrades en terminals mòbils operen en entorns singulars; per exemple, la presència del cos humà i la propagació del senyal de trajectes múltiples hi afegixen problemes addicionals. Aquests ambients particulars obliguen la comunitat d'antenes a caracteritzar les antenes integrades en terminals mòbils per aconseguir sistemes eficaços d'antena en aquest tipus de situació. D'una banda, els *phantoms* de cap i de mà s'utilitzen per a analitzar l'efecte del cos humà sobre el rendiment electromagnètic de les antenes i també l'efecte de la radiació de les antenes en el cos humà. Aquesta caracterització facilita la comprensió del comportament de l'antena i serveix per a dissenyar sistemes robusts d'antena a l'efecte del cos humà. D'altra banda, l'entorn de trajectes múltiples fomenta noves mesures com les cambres de reverberació, que poden emular un entorn de propagació real.

Finalment, es requereixen sistemes radiants més petits i multibanda per a permetre la integració de components de telèfons mòbils com pantalles grans, que són una característica comuna dels telèfons intel·ligents actuals i un factor important per a l'usuari final. En relació amb això, els elements no ressonants excitadors del pla de massa que s'han presentat en aquest mòdul ofereixen una alternativa a les tecnologies actuals d'antena, ja que redueixen significativament el volum ocupat pel sistema radiant i preserven al mateix temps el rendiment electromagnètic. S'ha demostrat un exemple de dos elements miniatura que tenen una mida de tan sols 5 mm × 5 mm × 5 mm funcionant a GSM 850, GSM 900, GSM 1800, GSM 1900 i UMTS i amb resultats també en altres configuracions que inclouen els estàndards LTE en els marges 698-960 MHz i 1710-2690 MHz. En conclusió, aquesta tecnologia resulta prometedora per a la nova generació de terminals mòbils.

Bibliografia

Abedin, M. F.; Ali, M. (2003). "Modifying the ground plane and its effect on planar inverted-F antennas (PIFAs) for mobile phone handsets". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2).

Aguilar, D.; Anguera, J.; Ribó, M.; Puente, C. (2008). "Small handset antenna for FM reception". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, núm. 10).

Andersson, M.; Wolfgang, A.; Orlenius, C.; Carlsson, J. (2009). "Measuring performance of 3GPP LTE terminals and small base stations in reverberation chambers". *Long Term Evolution: 3GPP LTE Radio and Cellular Technology* (cap. 12). CRC Press.

Andújar, A.; Anguera, J. (2012). "Compact radiating array for wireless handheld or portable devices". Sol·licitud de patent US 61/661,885, 20 de juny.

Andújar, A.; Anguera, J. (2012). "Multiband coplanar ground plane booster antenna technology". *Electronic Letters* (vol. 48, núm. 21, pàg. 1326-1328).

Andújar, A.; Anguera, J. (2012). "On the radiofrequency system of ground plane booster antenna technology". *Electronics Letters* (vol. 48, núm. 14, pàg. 815-817).

Andújar, A.; Anguera, J. (2013). "Magnetic boosters for multi-band operation". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 55, núm. 1, pàg. 65-75).

Andújar, A.; Anguera, J.; Cobo, Y.; Picher, C. (2012). "Distributed antenna systems for wireless handheld devices robust to hand loading". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 60, núm. 10, pàg. 4830-4837).

Andújar, A.; Anguera, J.; Picher, C.; Puente, C. (2012). "Ground plane booster antenna technology. Human head interaction: Functional and biological analysis". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2012*. Praga (República Txeca).

Andújar, A.; Anguera, J.; Puente, C. (2010). "A systematic method to design broadband matching networks". *European Conference on Antennas and Propagation – EuCAP 2010*. Barcelona (Espanya).

Andújar, A.; Anguera, J.; Puente, C. (2011). "Ground plane boosters as a compact antenna technology for wireless handheld devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 59, núm. 5, pàg. 1668-1677).

Andújar, A.; Anguera, J.; Puente, C.; Picher, C. (2011). "Wireless device capable of multiband MIMO operation". Sol·licitud de patent WO 2012/017013.

Anguera, J. (2003). "Fractal and broadband techniques on miniature, multifrequency, and high-directivity microstrip patch antennas". Dissertació en el Departament de Teoria del senyal i comunicacions. Universitat Politècnica de Catalunya.

Anguera, J.; Aguilar, D.; Vergés, J.; Ribó, M.; Puente, C. (2008). "Handset antenna design for FM reception". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. San Diego (EUA).

Anguera, J.; Andújar, A. (2011). "Antennaless wireless device comprising one or more bodies". Sol·licitud de patent WO 2011/095330.

Anguera, J.; Andújar, A. (2012). "Ground plane contribution in wireless handheld devices using radar cross section analysis". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 26, pàg. 101-114).

Anguera, J.; Andújar, A.; Cobo, Y.; Picher, C.; Puente, C. (2011). "Handset antenna array to mitigate the finger loading effect". *European Conference on Antennas and Propagation, EuCAP 2011* (pàg. 611-614). Roma (Itàlia).

Anguera, J.; Andújar, A.; García, C. (2013). "Multiband and small coplanar antenna system for wireless handheld devices". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 61, núm. 7, pàg. 3782-3789).

Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C. (2011). "A mechanism to electrically enlarge the ground plane of handset antennas: a bandwidth enhancement technique". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 53, núm. 7, pàg. 1512-1517).

Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Mumbrú, J. (2009). "Antennaless wireless device". Sol·licitud de patent WO2010/015365 (31 de juliol).

Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Mumbrú, J. (2009). "Antennaless wireless device capable of operation in multiple frequency regions". Sol·licitud de patent WO2010/015364, 31 de juliol.

Anguera, J.; Borja, C.; Picher, C.; Andújar, A. "Wireless device providing operability for broadcasting standards and method enabling such operability". Sol·licitud de patent WO/2010/145825.

Anguera, J.; Camps, A.; Andújar, A.; Puente, C. (2009). "Enhancing the robustness of handset antennas to finger loading effects". *Electronics Letters* (vol. 45, núm. 15, pàg. 770-771).

Anguera, J.; Condes, A.; Soler, J.; Puente, C. "Coupled multiband antennas". Sol·licitud de patent WO 04/025778.

Anguera, J.; Pérez, A. (2008). *Teoria d'antenes* (ISBN: 978-84-935665-4-8).

Anguera, J.; Picher, C.; Andújar, A.; Puente, C. (2012). "Concentrated antennaless wireless device providing operability in multiple frequency regions". Sol·licitud de patent US61/671906, juliol.

Anguera, J.; Puente, C. (2005). "Handset with electromagnetic bra". Sol·licitud de patent WO 2005/083833.

Anguera, J.; Puente, C. (2005). "Shaped ground plane for radio apparatus". Sol·licitud de patent WO 2006/070017.

Anguera, J.; Puente, C. (2007). "Distributed antenna system robust to human loading effects". Sol·licitud de patent WO 2007/141187.

Anguera, J.; Puente, C.; Borja, C.; Font, G.; Soler, J. (2001). "A systematic method to design single-patch broadband microstrip patch antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 31, núm. 3, pàg. 185-188).

Anguera, J.; Puente, C.; Borja, C.; Soler, J. (2005). "Fractal-shaped antennas: a review". *Wiley Encyclopedia of RF and Microwave Engineering* (vol. 2, pàg. 1620-1635).

Anguera, J.; Puente, C.; Martínez, E.; Rozan, E. (2003). "The fractal Hilbert monopole: A two-dimensional wire". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 36, núm. 2, pàg. 102-104).

Anguera, J.; Sanz, A. (2007). "Wireless portable device including internal broadcast receiver". Sol·licitud de patent WO 2007/128340.

Anguera, J.; Sanz, I.; Mumbrú, J.; Puente, C. (2010). "Multi-band handset antenna with a parallel excitation of PIFA and slot radiators". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 2, pàg. 348-356).

Anguera, J.; Sanz, I.; Sanz, A.; Condes, T.; Gala, D.; Puente, C.; Soler, J. (2006). "Enhancing the performance of handset antennas by means of groundplane design". *IEEE International Workshop on Antenna Technology: Small Antennas and Novel Metamaterials (iWAT 2006)*. Nova York (EUA).

Anguera, J.; Sanz, I.; Sanz, A.; Condes, T.; Puente, C.; Soler, J. (2006). "Multiband PIFA handset antenna by means of groundplane design". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Albuquerque (Nou Mèxic, EUA).

"Basic standard for the measurement of specific absorption rate related to human exposure to electromagnetic fields from mobile phones (300 MHz - 3 GHz)". J, CENELEC-European Committee for Electrotechnical Standardization Std. EN 50 361 (2001, juliol).

Best, S. R. (2002). "A comparison of the performance properties of the Hilbert curve fractal and meander line monopole antennas". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 35, núm. 4, pàg. 258-262).

Best, S. R. (2003). "A comparison of the resonant properties of small space-filling fractal antennas". *IEEE Antennas and Propagation Letters* (vol. 2, pàg. 197-200).

Best, S. R.; Morrow, J. D. (2002). "The effectiveness of space-filling fractal geometry in lowering the resonant frequency". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 1, pàg. 112-115).

Best, S. R.; Morrow, J. D. (2003). "On the significance of current vector alignment in establishing the resonant frequency of small space-filling wire antennas". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, pàg. 201-204).

Borja, C.; Anguera, J.; Puente, C.; Vergés, J. (2010). "How much can be reduced the internal FM antenna of mobile phones, yet still listening to the FM radio properly?". *European Conference on Antennas and Propagation*. EuCAP 2010, Barcelona (Espanya).

Byndas, A.; Hossa, R.; Bialkowski, M. E.; Kabacik, P. (2007). "Investigations into operation of single multi-layer configuration of planar inverted-F antenna". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 49, núm. 4, pàg. 22-33).

Cabedo, A.; Anguera, J.; Picher, C.; Ribó, M.; Puente, C. (2009). "Multi-band handset antenna combining a PIFA, slots, and ground plane modes". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pàg. 2526-2533).

Cabedo, M.; Antonino, E.; Rodrigo, V.; Suárez, C. (2006). "Análisis modal de un plano de masa radiante doblado y con una ranura para terminales móviles". *Proceedings of the XXI National Symposium URSI '06*. Oviedo (Espanya).

Fano, R. M. (1950). "Theoretical limitations on the broad-band matching of arbitrary impedances". *Journal of the Franklin Institute* (vol. 249, pàg. 57-83, gener 1950, i pàg. 139-154, febrer 1950).

Gala, D.; Soler, J.; Puente, C.; Borja, C.; Anguera, J. (2003). "Miniature microstrip patch antenna loaded with a space-filling line based on the fractal Hilbert curve". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 38, núm. 4, pàg. 311-312).

González-Arbesú, J. M.; Blanch, S.; Romeu, J. (2003). "Are space-filling efficient small antennas?". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 2, pàg. 147-150).

Holopainen, J.; Ilvonen, J.; Kivekäs, O.; Valkonen, R.; Icheln, C.; Vainikainen, P. (2009). "Near-field control of handset antennas based on inverted-top wavetraps: Focus on hearing-aid compatibility". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 8, pàg. 592-595).

Hossa, R.; Byndas, A.; Bialkowski, M. E. (2004). "Improvement of compact terminal antenna performance by incorporating open-end slots in ground plane". *IEEE Microwave and Wireless Components Letters* (vol. 14, núm. 6).

Hsieh, H. W.; Lee, Y. C.; Tiong, K. K.; Sun, J. S. (2009). "Design of a multiband antenna for mobile handset operations". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 8, pàg. 200-203).

Huynh, M. C.; Stutzman, W. (2003). "Ground plane effects on planar inverted-F antenna (PIFA) performance". *IEEE Proceedings on Microwave Antennas Propagation* (vol. 150, núm. 4).

IEEE (1998). "Safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300 GHz". *ANSI/IEEE C95.1*.

IEEE (2011). "American national standard for methods of measurement of compatibility between wireless communications devices and hearing aids". *ANSI C63 (9-2007)*.

Ilvonen, J.; Kivekäs, O.; Holopainen, J.; Valkonen, R.; Rasilainen, K.; Vainikainen, P. (2011). "Mobile terminal antenna performance with the user's hand: effect of antenna dimensioning and location". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 10, pàg. 772-775).

Ilvonen, J.; Valkonen, R.; Kivekäs, O.; Li, P.; Vainikainen, P. (2011). "Antenna shielding method reducing interaction between user and mobile terminal antenna". *Electronic Letters* (vol. 47, pàg. 896-897).

International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNRP). *Guidelines for limiting exposure to time-varying electric, magnetic, and electromagnetic fields (up to 300 GHz)*.

- Jung, J. M.; Kim, S. J.; Kong, K. H.; Lee, J. S.; Lee, B.** (2007). "Designing ground plane to reduce hand effects on mobile handsets". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium*. Honolulu (Hawaii, EUA).
- Kanj, H.; Ali, S. M.** (2009). "Compact multiband folded 3-D monopole antenna". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 8, pàg. 185-188).
- Kildal, P. S.; Carlsson, J.; Carlberg, U.** (2012). "Definition of antenna diversity gain in user-distributed 3D-random line-of-sight". *IEEE Antennas and Propagation Wireless Letters*.
- Kildal, P. S.; Orlenius, C.; Carlberg, U.** (2012). "MIMO LTE OTA measurements in reverberation chamber: Rich isotropic reference environment makes agreement with theoretical system model". *Proceedings of the Sixth European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)*. Praga.
- Kildal, P. S.; Rosengren, K.** (2004). "Correlation and capacity of MIMO systems and mutual coupling, radiation efficiency, and diversity gain of their antennas: simulations and measurements in a reverberation chamber". *IEEE Communications Magazine* (vol. 42, pàg. 104-112).
- Kumar, S.; Shafai, L.; Jacob, N.** (2004). "Investigation of wide-band microstrip slot antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 52, núm. 3, pàg. 865-872).
- Lee, C. T.; Wong, K. L.** (2009). "Internal WWAN clamshell mobile phone antenna using a current trap for reduced ground plane effects". *Antennas and Propagation, IEEE Transactions on* (vol. 57, núm. 10, pàg. 3303-3308).
- Lee, C. T.; Wong, K. L.** (2010). "Planar monopole with a coupling feed and an inductive shorting strip for LTE/GSM/UMTS operation in the mobile phone". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 7, pàg. 2479-2483).
- Lee, J. S.; Kang, G. C.; Jung, B.; Jung, W.; Park, M. J.; Han, S. H.; Harackiewicz, F. J.; Lee, B.** (2005). "Triple band internal antenna using matching circuits". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (vol. 1A, pàg. 442-445).
- Li, C. H.; Ofli, E.; Chavannes, N.; Kuster, N.** (2009). "Effects of hand phantom on mobile phone antenna performance". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 9, pàg. 2763-2770).
- Li, Y.; Cantin, T.; Derat, B.; Pasquet, D.; Bolomey, J. C.** (2007). "Application of resonant matching circuits for simultaneously enhancing the bandwidth of multi-band mobile phones". *International Workshop Antenna Technology: Small and Smart Antennas Metamaterials and Applications*. IWAT '07 (pàg. 479-482).
- Li, Y.; Derat, B.; Pasquet, D.; Bolomey, J. C.** (2007). "Matching limits for a dual-band mobile phone antenna". *Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications, 2007 International Symposium on* (pàg. 656-659).
- Lin, C.; Wong, K. L.** (2007). "Printed monopole slot antenna for internal multiband mobile phone antenna". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 55, núm. 12, pàg. 3690-3697).
- Lindberg, P.; Kaikkonen, A.** (2007). "Built-in handset antennas enable FM transceivers in mobile phones". *RF Design Magazine*.
- Lindberg, P.; Öjefors, E.** (2006). "A bandwidth enhancement technique for mobile handset antennas using wavetraps". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 8).
- Ma, J.; Yin, Y. Z.; Guo, J. L.; Huang, Y. H.** (2010). "Miniature printed octaband monopole antenna for mobile phones". *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters* (vol. 9, pàg. 1033-1036).
- Manteuffel, D.; Bahr, A.; Wolff, I.** (2000). "Investigation on integrated antennas for GSM mobile phones". *Millennium Conference on & Antennas Propagation*, ESA, AP2000, Davos (Suïssa).
- Martínez-Vázquez, M.; Litschke, O.; Geissler, M.; Heberling, D.; Martínez-González, A. M.; Sánchez-Hernández, D.** (2006). "Integrated planar multiband antennas for personal communication handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 2).

Miller, S. (2009). "Motorola executive helped spur cellphone revolution". *Wall Street Journal* (20-21 de juny, pàg. A10). Accessible en línia.

Orlenius, C.; Kildal, P. S.; Poilasne, G. (2005). "Measurements of total isotropic sensitivity and average fading sensitivity of CDMA phones in reverberation chamber". *IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium* (3-8 de juliol, pàg. 409-412). Piscataway (NJ, EUA).

Ozden, S.; Nielsen, B. K.; Jorgensen, C. H.; Villanen, J.; Icheln, C.; Vainikainen, P. (2007). "Quad-band coupling element antenna structure". Sol·licitud de patent U.S. 7,274,340 (25 de setembre).

Pelosi, M.; Franek, O.; Knudsen, M. B.; Pedersen, G. F.; Andersen, J. B. (2010). "Antenna proximity effects for talk and data modes in mobile phones". *IEEE Antenna and Propagation Magazine* (vol. 52, núm. 3, pàg. 15-27).

Picher, C.; Anguera, J.; Andújar, A.; Borja, C.; Puente, C.; Kahng, S. (2011). "Reuse of the mobile communication antenna for FM reception". *European Conference on Antennas and Propagation* (pàg. 324-327). EuCAP 2011, Roma (Itàlia).

Picher, C.; Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Kahng, S. (2012). "Analysis of the human head interaction in handset antennas with slotted ground planes". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 54, núm. 2, pàg.36-56).

Picher, C.; Anguera, J.; Cabedo, A.; Puente, C.; Kahng, S. (2009). "Multiband handset antenna using slots on the ground plane: Considerations to facilitate the integration of the feeding transmission line". *Progress In Electromagnetics Research Conference* (vol. 7, pàg. 95-109).

Pladevall, A.; Picher, C.; Andújar, A.; Anguera, J. (2011). "Some thoughts on human body effects on handset antenna at the fm band". *Progress In Electromagnetics Research Magazine* (vol. 19, pàg. 121-132).

Puente, C.; Borja, C.; Anguera, J.; Soler, J. (1999). "Multilevel antennas". Sol·licitud de patent WO0122528.

Puente, C.; Rozan, E.; Anguera, J. (2000). "Space filling miniature antennas". Sol·licitud de patent WO0154225.

Risco, S.; Anguera, J.; Andújar, A.; Pérez, A.; Puente, C. (2010). "Coupled monopole antenna design for multiband handset devices". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 52, núm. 10, pàg. 359-364).

Rowell, C. R.; Murch, R. D. (1998). "A compact PIFA suitable for dual-frequency 900/1800-MHz operation". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 46, núm. 4).

Sanz, I.; Anguera, J.; Andújar, A.; Puente, C.; Borja, C. (2010). "The Hilbert monopole revisited". *European Conference on Antennas and Propagation*. Barcelona: EuCAP.

Sanz-Izquierdo, B.; Batchelor, J.; Langley, R. (2004). "Multiband printed PIFA antenna with ground plane capacitive resonator". *Electron. Lett.* (vol. 40, núm. 22).

Skårbratt, A.; Åsberg, J.; Orlenius, C. (2011). "Over-the-air performance testing of wireless terminals by data throughput measurements in reverberation chamber". *European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP2011)*. Roma.

Taga, T. (1990). "Analysis for mean effective gain of mobile antennas in land mobile radio environments". *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (vol. 39, núm. 2, pàg. 117-131).

Taga, T.; Tsunekawa, K. (1987). "Performance analysis of a built-in planar inverted-F antenna for 800MHz band portable radio units". *IEEE Transactions on Selected Areas in Communication* (vol. SAC-5, núm. 5, pàg. 921-929).

Takemura, N. (2009). "Inverted-FL antenna with self-complementary structure". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 57, núm. 10, pàg. 3029-3034).

Vainikainen, P.; Ollikainen, J.; Kivekäs, O.; Kelander, I. (2002). "Resonator-based analysis of the combination of mobile handset antenna and chassis". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 50, núm. 10, pàg. 1433-1444).

Valkonen, R.; Myllymaki, S.; Huttunen, A.; Holopainen, J.; Ilvonen, J.; Vainikainen, P.; Jantunen, H. (2010). "Compensation of finger effect on a mobile terminal anten-

na by antenna selection". *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)* (pàg. 364-367).

Vergés, J.; Anguera, J.; Puente, C.; Aguilar, D. (2009). "Analysis of the human body on the radiation of FM handset antenna". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 51, núm. 11, pàg. 2588-2590).

Villanen, J.; Ollikainen, J.; Kivekäs, O.; Vainikainen, P. (2006). "Coupling element based mobile terminal antenna structures". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 54, núm. 7, pàg. 2142-2153).

Vinoy, K. J.; Jose, K. A.; Varadan, V. K.; Varadan, V. V. (2001). "Hilbert curve fractal antenna: A small resonant antenna for VHF/UHF applications". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 29, núm. 4, pàg. 215-219).

Vinoy, K. J.; Jose, K. A.; Varadan, V. K.; Varadan, V. V. (2001). "Resonant frequency of Hilbert curve fractal antenna". *IEEE APS* (vol. 3, pàg. 648-651).

Wong, K. L. (2003). "Planar antennas for wireless communications". Wiley Inter-Science.

Wong, K. L.; Chen, S. C. (2010). "Printed single-strip monopole using a xip inductor for penta-band WWAN operation in the mobile phone". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 58, núm. 3, pàg. 1011-1014).

Wong, K. L.; Huang, C. H. (2008). "Printed loop antenna with a perpendicular feed for penta-band mobile phone application". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 56, núm. 7, pàg. 2138-2141).

Wong, K. L.; Kuo, J. S.; Chiou, T. W. (2001). "Compact microstrip antennas with slots loaded in the ground plane". *11th International Conference on Antennas and Propagation* (núm. 480).

Wong, K. L.; Lee, G. Y.; Chiou, T. W. (2003). "A low-profile planar monopole antenna for multiband operation of mobile handsets". *IEEE Transactions on Antennas and Propagation* (vol. 51, núm. 1, pàg. 121-125).

Wu, T. Y.; Wong, K. L. (2002). "On the impedance bandwidth of a planar inverted-F antenna for mobile handsets". *Microwave Opt. Tech. Lett.* (vol. 32, pàg. 249-251).

Wu, C. H.; Wong, K. L. (2008). "Hexa-band internal printed slot antenna for mobile phone application". *Microwave and Optical Technology Letters* (vol. 50, pàg. 35-38).

Yu, W.; Yang, S.; Tang, C.-L.; Tu, D. (2010). "Accurate simulation of the radiation performance of a mobile slide phone in a hand-head position". *IEEE Antennas and Propagation Magazine* (vol. 52, pàg. 168-177).

Enllaços d'interès

www.ctia.org

www.fcc.gov