

Designs of Multiple Input Multiple Output Antennas for GSM, LTE, WIMAX and WLAN Standards

Abdurrahim Toktas (Corresponding author)
Department of Electrical and Electronics Engineering,
Faculty of Engineering, Karamanoglu Mehmet Bey University,
70100, Karaman, Turkey,
E-mail: atoktas@kmu.edu.tr

Ali Akdagli
Department of Electrical and Electronics Engineering,
Faculty of Engineering, Mersin University,
33343, Ciflikkoy, Yenisehir, Mersin, Turkey,
E-mail: akdagli@mersin.edu.tr

Abstract

Data transmitting rate of wireless communication systems has been remarkably increased in recent years owing to the transferring requirements of the enormous data belonging to the multimedia services. Multiple inputs multiple outputs (MIMO) systems have been one of the most significant breakthrough in modern wireless communication due to overcoming the limited channel capacity. A MIMO system is capable of simultaneously transmitting multiple signals through spatially parallel channels between isolated multiple antennas. The MIMO technology has been recently adapted to latest mobile communication standards such as long term evolution (LTE), worldwide interoperability for microwave access (WiMAX) and wireless local area network (WLAN). It is, therefore, necessary to incorporate compact, wideband MIMO antennas with high isolation between antenna elements to mobile terminals. In recent years, MIMO antenna designs vary in geometry, size, bandwidth and isolation are available in the literature. In this study, MIMO antenna designs proposed for wireless handsets in the literature have been reviewed and some highlighted designs are summarized to collect a single resource. It is seen that in designs, two identical and symmetrical antenna elements were generally utilized and antennas were designed by considering the GSM, LTE, WiMAX and WLAN wireless standards. These antenna designs have been compared in terms of their geometries, sizes, supported bands and bandwidth, isolation levels and the techniques used to improve the mutual coupling between antenna elements.

Keywords: Antenna, microstrip antenna, multiple inputs multiple outputs (MIMO), wireless communication systems, mobile handsets

GSM, LTE, WIMAX ve WLAN Standartları İçin Çok Girişli Çok Çıkışlı Anten Tasarımları

Özet

Kablosuz iletişim sistemlerinin veri iletim hızı, çoklu ortam servislerine ait yüksek miktardaki veri transfer ihtiyacından dolayı son yıllarda hızlı bir şekilde artmıştır. Çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ–multiple input multiple output: MIMO) sistemler, sınırlı kanal kapasitesini aşabildiği için modern kablosuz iletişim sistemlerinde yeni bir dönem açmıştır. ÇGÇÇ sistemleri, izole edilmiş çoklu antenler arasında sağlanan uzaysal paralel kanallar üzerinden eş zamanlı veri transferi yapabilme kabiliyetine sahiptir. ÇGÇÇ teknolojisi son yıllarda, LTE (long term evolution), WiMAX (worldwide interoperability for microwave access) ve WLAN (wireless local area network) gibi kablosuz iletişim standartlarına adapte edilmiştir. Bu durum, kompakt, geniş bant, anten elemanları arasında yüksek yalıtımlı ÇGÇÇ antenlerin

gezgin cihazlara entegre edilmesini gerektirmiştir. Son yıllarda, birbirinden farklı geometrik şekillere, boyutlara, bant genişliğine ve yalıtım seviyesine sahip ÇGÇÇ anten tasarımları literatürde bulunmaktadır. Bu çalışmada, gezgin cihazlar için literatürde farklı yerlerde önerilmiş ÇGÇÇ anten tasarımları taranmıştır ve tek bir kaynak oluşturmak amacıyla öne çıkan tasarımlar özetlenmiştir. Tasarımlarda genellikle, özdeş ve simetrik iki anten elemanının tercih edildiği ve antenlerin GSM, LTE, WiMAX ve WLAN standartları dikkate alınarak tasarlandığı görülmüştür. Bu anten tasarımları; geometrileri, boyutları, destekledikleri bantlar ve bant genişlikleri, yalıtım seviyeleri ve anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için kullanılan teknikler yönünden karşılaştırılmıştır.

Anahtar kelimeler: Anten, mikroşerit anten, çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ), kablosuz iletişim sistemleri, gezgin cihazlar

1. Giriş

1. Nesil GSM (global system for mobile communications) sistemi, 1980 yılında analog olarak kullanılmaya başlanılmıştır. Bu sistem, on yıl sonra sayısallaştırılarak 2. Nesil olarak kullanılmaya devam edilmiştir. Sadece telefon iletişiminin yapılabildiği 2. Nesil sistem, veri alışverişi yapmak amacıyla 56 kb/sn iletim hızına sahip GPRS (general packet radio service) standardı eklenerek 2,5. Nesil'e dönüştürülmüştür. 2,5. Nesil altyapısına daha sonra 236,8 kb/sn veri iletim kapasitesine sahip EDGE (enhanced data rates for GSM evolution) teknolojisi entegre edilerek 2,75 Nesil oluşturulmuştur. Bu teknolojilerin gelişmesi, yüksek veri hızı gerektiren çoklu ortam servislerine yönelik taleplerin artmasına neden olmuştur. 2000'li yılların başında UMTS/W-CDMA (universal mobile telecommunications system/ wideband-code division multiple access), CDMA2000 ve HSPA (high speed packet access) standartlarının geliştirilmesiyle 10 Mb/sn'e kadar gezgin geniş bant internet hizmeti verilebilen 3. Nesil altyapısı oluşturulmuştur.

3. Nesil'e kadar, tek kanala sahip geleneksel tek girişli tek çıkışlı sistemler ile sadece zaman, frekans ve kod çoğullama teknikleri kullanılarak iletişim sistemlerinin kapasitesi artırılmaya çalışılmıştır. Kullanılan gücün kısıtlı olması, alıcı ve verici arasındaki mesafenin uzun olması, direk görüş olmaması ve alıcının gezgin olması gibi nedenlerden dolayı iletilen sinyal saçılmalara ve zayıflamaya uğramaktadır. Kapasite artırmaya yönelik çalışmalar, bu nedenlerden dolayı sınırlı olarak gelişmiştir. Bu sınırlamaya en iyi çözüm, son yıllarda geliştirilen çok girişli çok çıkışlı (ÇGÇÇ-multiple input multiple output: ÇGÇÇ) sistemleridir. ÇGÇÇ sistemlerinin en önemli özelliği, bugüne kadar kullanılmayan uzaysal alanı (spatial domain) kullanarak çoklu kanal üzerinden paralel veri alışverişi yapabilmesidir. Başka bir deyişle, ÇGÇÇ sisteminde uzaysal alan kullanılarak aynı zaman ve frekansta çoklu anten üzerinden paralel veri iletimi yapılabilmektedir. ÇGÇÇ sisteminin en önemli avantajı; sistemin çeşitleme (diversity) [1-4] ve uzaysal çoğullama (spatial multiplexing) [5-7] yapabilmesidir. Uzaysal çoğullama ile veri, alt bantlara bölünerek paralel kanallar üzerinden transfer edildiğinden kanal kapasitesi (veri iletim oranı) artırılmaktadır. Uzaysal çoğullama tekniği üzerinde yapılan en önemli çalışmalar; D-BLAST (Diagonal-Bell Laboratories layered space-time) [7] ve V-BLAST'dır (Vertical-BLAST) [6]. Verici tarafından iletilen sinyaller çoklu kanalların bulunduğu ortamdaki çeşitli yapılardan veya engellerden saçılmaktadır ve alıcı tarafına birbirinden farklı zayıflamaya uğramış sinyal kopyaları ulaşmaktadır. Alıcı tarafında çeşitleme teknikleri kullanılarak alınan sinyaller tekrar elde edilmektedir [1-4]. Ayrıca, en az zayıflama ve hata oranına sahip iletim kanallarının seçimi esasına dayanan anten seçme (antenna selection) tekniği, ÇGÇÇ sistemlerinde kullanılır [8, 9]. Uzaysal çoğullama ile kanal kapasitesi artırılırken, çeşitleme tekniği ile hata oranı azaltılarak yüksek verim elde edilmektedir. Anten seçme tekniği; uzaysal çoğullama ve çeşitleme teknikleri ile birlikte kullanılabilir [8, 9]. ÇGÇÇ sistemlerinde uzaysal çoğullama ve çeşitleme teknikleri ayrı ayrı kullanılabilir gibi her iki teknik, hibrit olarak da kullanılmaktadır [10-12].

ÇGÇÇ teknolojisinin kullanılmasıyla birlikte kablosuz iletişim sistemlerinde yeni bir döneme girilmiştir. ÇGÇÇ sistemlerinin uygulanması ile 4. Nesil'in en önemli standardı olan LTE (long term evolution) geliştirilmiştir. LTE standardı, kullanıldığı ülkelere göre değişen 400-4000 MHz arasındaki çeşitli bantlarda çalışmaktadır ve 1 Gb/sn'e kadar veri iletim kapasitesi sunmaktadır. LTE standardı, diğer teknolojilerin dayandığı TDMA (time division multiplexing access) ve CDMA (code division multiple

access) modülasyon tekniklerinden farklı olarak OFDMA (orthogonal frequency division multiplexing access) tekniğini kullanmaktadır. Bugüne kadar, ÇGÇÇ teknolojisi, LTE'nin yanı sıra WiMAX (worldwide interoperability for microwave access), HSPA+ ve WLAN (wireless local area network) gibi yeni nesil radyo frekans standartlarına adapte edilmiştir [11, 13-16].

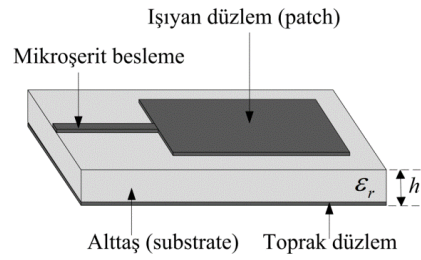
ÇGÇÇ sistemlerinin kablosuz iletişim standartlarına hızla adapte edilmesiyle birlikte, bu sistemlerin en önemli özelliği olan fiziksel ara yüzde çalışan ÇGÇÇ antenlere ihtiyaç duyulmuştur. Günümüz iletişim sistemleri, gezgin tarafında küçük ve ince cihazlar kullandığı için bunların içine yerleştirilebilen ÇGÇÇ antenlerin tasarlanması oldukça zordur. Çünkü ışık yayan anten elemanları, küçük alanda birbirine yakın çalıştıkları için elemanlar arasında elektromanyetik ortak etkileşim meydana gelmektedir. Bu durum, anten elemanlarının ÇGÇÇ olarak çalışmasına engel olmaktadır. Verimli bir ÇGÇÇ sistemi için anten elemanları arasında elektriksel yalıtımın sağlanması gerekmektedir. Literatürde, anten elemanları arasındaki yalıtımın artırılmasına yönelik bazı teknikler önerilmiştir. Bu yöntemlerden en etkili olanları, anten elemanlarının birbirine göre dikey olarak yerleştirilmesi [17], ışık yayan düzlemde veya toprak düzlemde parazitik eleman kullanılması [18] ve boşluk açılmasıdır [19]. Işıyan elemanlara ilave olarak uygun parazitik eleman ve boşlukların tasarlanması da, ÇGÇÇ anten tasarımında önemli bir zorluk olarak karşımıza çıkmaktadır. Son yıllarda gezgin terminaller için yukarıda bahsedilen kriterleri sağlamaya dönük geometrileri, boyutları, çalıştıkları frekans bantları ve anten elemanları arasındaki yalıtım seviyeleri birbirinden farklı, birkaç ÇGÇÇ anten tasarımları literatürde sunulmuştur.

Bu çalışmada, ÇGÇÇ anten yapıları ve anten tasarımında kullanılan teknikler özetlenmiştir ve literatürde farklı yerlerde sunulmuş ÇGÇÇ anten tasarımlarından öne çıkanlarının belirgin özellikleri bir araya getirilerek etkili bir derleme oluşturulması amaçlanmıştır. Bu amaçla, literatürde bulunan ÇGÇÇ antenlerin fiziksel ve karakteristik özellikleri incelenmiştir. Bölüm 3.4'de bu antenlere ait ayrıntılı bir karşılaştırma tablo olarak verilmiştir. Genel olarak, bu antenlerin GSM, LTE, WiMAX ve WLAN bantlarını desteklediği görülmektedir. Anten tasarımları yapısal anlamda; düzlemsel, ters F anten (TFA–inverted F antenna: IFA) ve düzlemsel ters F anten (DTFA–planar inverted F antenna: PIFA) olarak sınıflandırılabilir. [20-26] çalışmalarında önerilen ÇGÇÇ antenler, simetrik olarak yerleştirilmiş düzlemsel özdeş iki elemandan oluşmaktadır. Simetrik ve özdeş iki TFA elemana sahip ÇGÇÇ antenler, [27-29] çalışmalarında sunulmuştur. Diğer taraftan, DTFA elemanlı simetrik, özdeş ÇGÇÇ antenler, [30-34] çalışmalarında tasarlanmıştır. Bu antenlerin elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için toprak düzlemde çeşitli şekillerde şeritler ve boşluklar önerilmiştir.

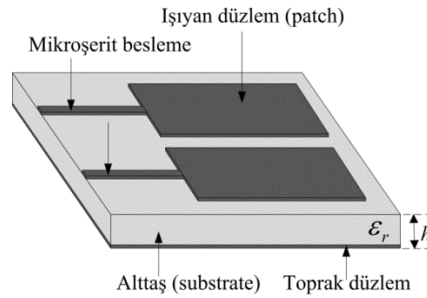
Sonraki bölümde mikroşerit anten tipleri, ÇGÇÇ uygulamaları ve kullanılan yalıtım teknikleri anlatılacaktır. 3. bölümde, anten çeşitlerine göre kablosuz gezgin cihazlar için literatürde önerilmiş bazı ÇGÇÇ anten tasarımları incelenecektir. Sonra, bu antenler, geometrileri, boyutları, desteklediği bant genişliği, anten elemanları arasındaki yalıtımı artırmak için kullanılan teknikler açısından karşılaştırılacaktır. Son olarak 4. bölümde sonuçlar yorumlanacaktır.

2. Mikroşerit Anten Tipleri ve ÇGÇÇ Uygulamaları (Microstrip Antenna Types and MIMO Applications)

ÇGÇÇ sistemlerine uyumlu gezgin cihazlarda, küçük boyut, hafiflik, düşük maliyet, üretim basitliği ve birleşik devrelere kolay yerleşimi gibi avantajlarından dolayı genellikle mikroşerit antenler tercih edilmektedir [35, 36]. Tipik bir mikroşerit anten yapısı, ışık yayan düzlem ve toprak düzlem arasına h yüksekliğinde ϵ_r dielektrik sabitine sahip bir alttaş malzeme yerleştirilerek elde edilir. Işıyan düzlemdeki iletken yamanın beslenmesinde genellikle mikroşerit hat besleme, koaksiyel besleme, kuplaj besleme ve dalda kılavuzu gibi yöntemler kullanılmaktadır [35, 36]. Şekil 1(a)'da mikroşerit hat beslemeli dikdörtgen bir mikroşerit anten yapısı gösterilmiştir. Mikroşerit antenler aynı zamanda düşük kazanç, düşük güçte çalışma ve dar bant genişliği gibi dezavantajlara da sahiptir. Buna karşın, anten geometrilerine uygulanan iletken yama ve toprak düzleminde boşluk açma (slot loading), kısa devre pin (shorting pin) ve yama bükme (bended/folded patch) gibi yöntemler kullanılarak istenilen karakteristiğe sahip antenler tasarlanabilmektedir [36].



(a)



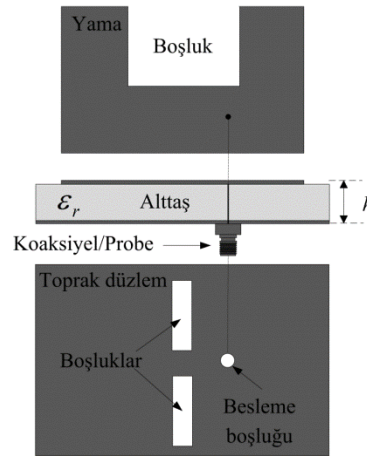
(b)

Şekil 1. Tipik mikroşerit anten yapıları: a) bir elemanlı anten, b) iki elemanlı ÇGÇÇ anten yapıları
(Typical microstrip antenna structure: a) antenna with one element, b) MIMO antenna with two elements)

ÇGÇÇ antenler, karşılıklı iletişim yapabilen, birbirinden ayrı besleme girişlerine sahip birden fazla anten elemanının aynı alttaş üzerinde elektriksel olarak yalıtılmış ve yüksek spektral verim sağlayan antenlerdir [11-16]. Şekil 1(b)'de, dikdörtgen, özdeş iki elemanlı temel bir ÇGÇÇ anten yapısı gösterilmiştir. Elemanlar üzerinde fiziksel değişikliklerle yapılarak farklı geometrilere sahip anten yapıları elde etmek mümkündür. Aynı özelliklere sahip kanallar elde edebilmek için anten elemanları genellikle özdeş tasarlanırlar ve birbirine göre simetrik olarak ana karta yerleştirilirler. Gezgin terminallerin küçülmesi ile birlikte kullanımının yaygınlaşması, bu cihazlara uyumlu mikroşerit antenlerin de yapı ve performans olarak bu gelişmeye ayak uydurmasını gerektirmiştir. Literatürde, geleneksel şekillere sahip düzlemsel mikroşerit antenlerin yanında isimlerini geometrik yapılarından alan eş-düzlemsel dalga kılavuzu (EDD-coplanar waveguide: CPW) beslemeli anten, TFA, DTFA gibi antenler bulunmaktadır [35, 36].

2.1 Düzlemsel Mikroşerit Antenler (Planar Microstrip Antennas)

Tasarım ve analiz kolaylığı açısından daha önceleri, boyut boyutlu ve dar bant genişliğine sahip dikdörtgen, üçgen ve daire gibi geleneksel şekillere sahip düzlemsel mikroşerit antenler yaygın olarak kullanılmıştır [35, 36]. Bu nedenle, geleneksel şekilli antenlerin fiziksel yapılarında boşluk açma, kısa devre ve yamanın bükülmesi gibi yöntemler kullanılarak performansı artırılmaya çalışılmaktadır. Şekil 2'de, boşluk açma yöntemi kullanılarak yama ve toprak düzlemi değiştirilmiş bir düzlemsel mikroşerit anten yapısı gösterilmiştir. Şekilde görüldüğü gibi anten yapısında yapılan değişiklikler, anten geometrisinin karmaşıklığını artırmaktadır. Bu sebeple yukarıda bahsedilen yöntemlerin hangi şekilde uygulanacağı ve uygulama yerlerinin belirlenmesi oldukça zor bir tasarım problemidir. Bu işlemleri başarmak için sayısal hesaplama yöntemleri ve optimizasyon tekniklerinden yararlanılmaktadır.

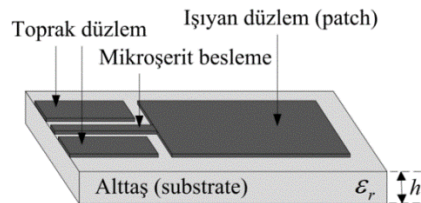


Şekil 2. Yapısı değiştirilmiş düzlemsel bir anten geometrisi (The geometry of a planar antenna whose structure has modified)

2.2 Eş-düzlemsel Dalga Kılavuzu Beslemeli Anten

(Coplanar-waveguide Fed Antenna)

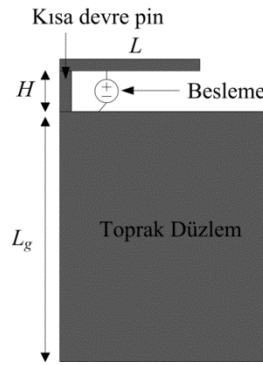
Şekil 3’de tipik bir EDD beslemeli anten geometrisi verilmiştir. Geleneksel düzlemsel mikroşerit antenden farklı olarak toprak ve yama iletkenleri aynı düzlem üzerine yerleştirilir. Mikroşerit besleme hattı, iki toprak düzlem arasında geçtiğinden dolayı dalga kılavuzuna benzediği için bu antene ismini vermiştir. EDD beslemeli antenlerin tasarlanmasında yukarıda anlatılan fiziksel değiştirme yöntemleri kullanılabilir. Bu anten yapısının en önemli avantajı, uygun değiştirme teknikleri kullanılarak geniş banda sahip antenlerin elde edilebilmesidir.



Şekil 3. EDD beslemeli bir anten geometrisi (The geometry of a CPW-fed antenna)

2.3 Ters F Anten (Inverted F Antenna)

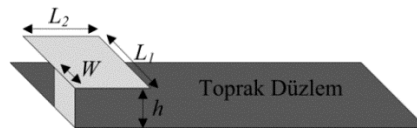
TFA, toprak düzlem ve ana kartla bütünleşik olarak tasarlanan bir anten çeşididir. Şekil 4’de tipik bir TFA geometrisi verilmiştir. Ters yatmış F harfine benzediği için bu ismi almıştır. Ana karta bütünleşik bir şekilde yerleştirilecek şekilde tasarlanabildiğinden, özellikle dizüstü bilgisayarlar, tabletler ve akıllı telefonlar gibi gezgin cihazlarda kullanılmaktadır. Işıma yapan yama kısmı, uygun boyutta ve geometride tasarlandığında istenilen frekansta çalışabilmektedir.



Şekil 4. Tipik bir TFA geometrisi (The geometry of a typical IFA)

2.4 Düzlemsel Ters F Anten (Planar Inverted F Antenna)

DTFA, Şekil 5’de gösterildiği gibi toprak düzlemden h yüksekliğinde bir düzleme yerleştirilmiş ve toprak düzlem ile kısa devre yapılmış bir iletken yama yapısından oluşmaktadır. TFA’dan farklı olarak ışına yapan düzlem, toprak düzlemden belirli bir yüksekliğe yerleştirilir. Dizüstü bilgisayarlar, tabletler ve akıllı telefonlar gibi gezgin terminallerin ana kartı ile bütünleşik olarak tasarlanabilmektedir. SAR (specific absorption rate) değeri düşük olduğu için son yıllarda cep telefonlarında yoğun olarak kullanılmaktadır. Işıma yapan yama kısmı, uygun boyutta ve geometride tasarlandığında istenilen frekansta çalışabilmektedir.



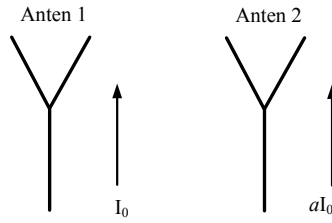
Şekil 5. Tipik bir DTFA geometrisi (The geometry of a typical PIFA)

Mikroşerit antenler dar bant genişliğine sahip oldukları için kablosuz iletişim uygulamalarına uyumlu ve küçük boyutlu anten tasarımı oldukça zordur. Gezgin cihazların işlevselliği arttıkça, antenler için ayrılan alan azalmaktadır. Bu cihazların ihtiyaç duyduğu küçük boyutlu ÇGÇÇ anten tasarımı önem kazanmakla birlikte çoklu elemanların aynı anda çalıştığı ÇGÇÇ antenlerin tasarımı birçok zorluğu barındırmaktadır. Çünkü birbirine yakın olarak çalışması gereken küçük boyutlu anten elemanları arasında elektromanyetik ortak etkileşim oluşmaktadır. Verimli bir ÇGÇÇ sistemi için anten elemanları arasında elektriksel yalıtımın sağlanması önemli bir tasarım kriteri olarak karşımıza çıkmaktadır.

2.5 Anten Elemanları Arasındaki Yalıtımın Artırılması

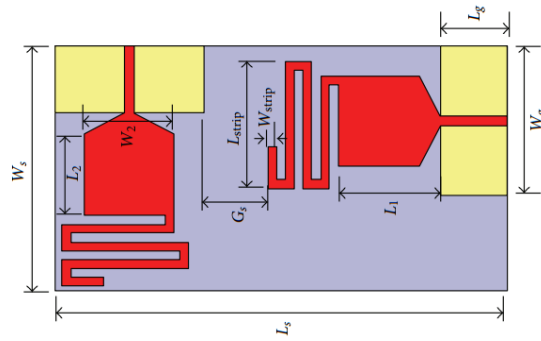
(Improving the Isolation Between Antenna Elements)

Birbirine yakın olarak yerleştirilmiş anten elemanları arasında elektromanyetik ortak etkileşim oluştuğunu daha önce söylemiştik. Şekil 6’da iki elemanlı bir ÇGÇÇ sistemi gösterilmiştir. Birbirine yakın olarak yerleştirilmiş birinci antene verilen I_0 akımı ile meydana gelen ışına, ikinci antenin iletkeninde ilave bir aI_0 akımının indüklenmesine neden olmaktadır [18].



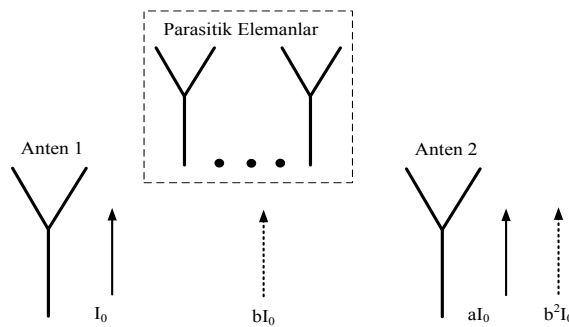
Şekil 6. İki elemanlı bir ÇGÇÇ sisteminde anten elemanları arasındaki ortak etkileşim [18] (The mutual coupling between the antenna elements of a MIMO systems with two elements [18])

Anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmaya yönelik literatürde çeşitli teknikler önerilmiştir. Bu tekniklerden en çok kullanılanlar; elemanların birbirine göre dikey olarak yerleştirilmesi, parasitik eleman kullanılması ve toprak düzleminde boşlukların açılması olarak sıralanabilir. Aynı polarizasyona sahip antenler aynı düzlemde, birbirine göre dikey olarak yerleştirilerek ortak etkileşim azaltılabilmektedir [37]. Bu yöntem uygulanarak elde edilen bir ÇGÇÇ anten, Şekil 7’de gösterilmiştir.



Şekil 7. Dikey elemanlı bir ÇGÇÇ anten yapısı [37] (A MIMO antenna with orthogonal elements [37])

Parasitik eleman, Şekil 8’de gösterildiği gibi ortak etkileşimi azaltmak için ÇGÇÇ anten dizisine fazladan eklenen elemana denir. Parasitik eleman da, anten elemanları gibi ortak etkileşimden dolayı yüzey akım indüklenmesine maruz kalmaktadır. Uygun şekillerde ve uygun noktalara yerleştirilmiş parasitik eleman üzerinde indüklenmiş akım, diğer anten elemanları üzerindeki istenmeyen yüzey akımlarını azaltmaktadır. Bu durum Eşitlik (1)’de ifade edilmiştir. Bu teknikte, uygun parasitik elemanın tasarlanmasının ve uygun yere yerleştirilmesinin çok zor bir tasarım çalışma olduğu unutulmamalıdır. Şekil 9’da parasitik eleman uygulanmış bir DTFA verilmiştir [18]. Bu antende, anten elemanlarına benzeyen iki özdeş L şekilli parasitik kol kullanılmıştır. Bu sayede, yaklaşık 10 dB’lik ilave bir yalıtım elde edilmiştir.



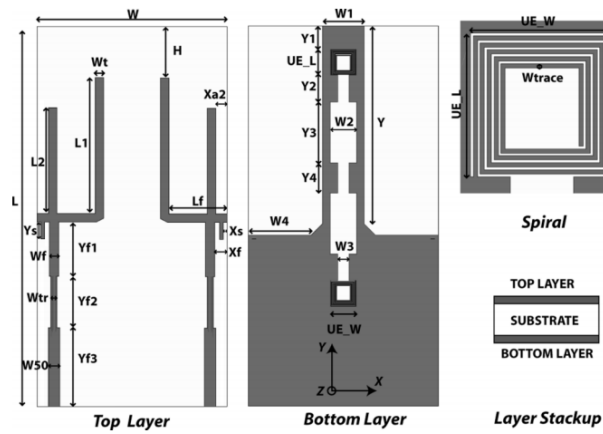
Şekil 8. Parasitik eleman kullanılarak yalıtımın artırılması [18] (Improving the isolation by using parasitic element [18])

3. Gezgin Cihazlar İçin ÇGÇÇ Anten Tasarımları

(MIMO Antennas For Mobile Handsets)

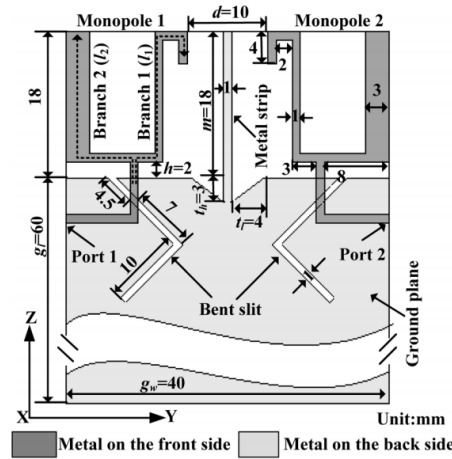
3.1 Düzlemsel ÇGÇÇ Anten Tasarımları (Planar MIMO Antennas Designs)

Çift bantlı, “4” şekilli bir ÇGÇÇ antenin geometrisi Şekil 11’de verilmiştir. Sharawi vd. [20] tarafından 2012 yılında, LTE uyumlu gezgin cihazlar için önerilen anten yapısı, iki özdeş ve simetrik elemandan oluşmaktadır. Çift banta sahip olan antenin çalışma bantları (–6 dB seviyesi için), alt bant 803–823 MHz, ve üst bant 2440–2900 MHz aralığını kapsamaktadır. Mikroşerit besleme yapısı ile birlikte anten boyutları $50 \times 100 \text{ mm}^2$ ’dir. Anten elemanları arasındaki yalıtımı artırmak için toprak düzleminde spiral şekilli parasitik yapılar kullanılmıştır. Böylece anten elemanları arasında en az 17 dB’lik bir yalıtım seviyesi elde edilmiştir. Parasitik elemanlarda göz önüne alındığında, anten yapısı gezgin kartın büyük bir kısmını kapladığı için nispeten büyüktür.



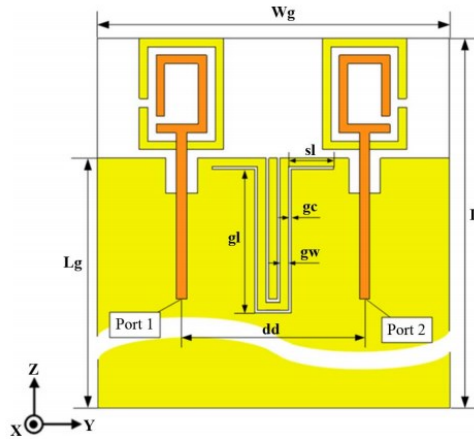
Şekil 11. “4” şekilli ÇGÇÇ anten geometrisi [20] (The geometry of “4”-shaped MIMO antenna [20])

Geometrisi Şekil 12’de gösterilen, özdeş ve simetrik iki elemandan oluşan bir ÇGÇÇ anten, Li vd. [21] tarafından 2012 yılında literatüre sunulmuştur. Şekilde görüldüğü gibi $15 \times 18 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahip anten elemanları, şerit beslemeli U şekilli iki koldan oluşmuştur. WLAN ve WIMAX uygulamalarına yönelik olarak tasarlanan anten, 2400–6550 MHz frekans aralığında çalışmaktadır. Anten elemanları arasındaki yalıtımı artırmak için toprak düzleminde $10 \times 13,5 \text{ mm}^2$ boyutlarında üçgen iki şerit boşluk ve $1 \times 18 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahip düz bir şerit tasarlanmıştır. Bu sayede çalışma frekansı boyunca en az 18 dB yalıtım seviyesi elde edilmiştir.



Şekil 12. U şekilli ÇGÇÇ anten geometrisi [21] (The geometry of U-shaped MIMO antenna [21])

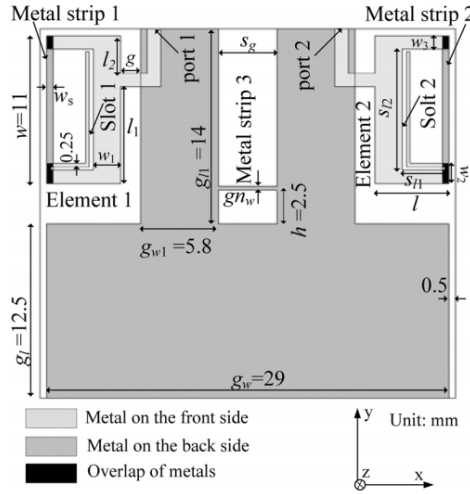
Anten geometrisi, Şekil 13’de verilen düzlemsel ÇGÇÇ anten, Zhou vd. [22] tarafından 2012 yılında geliştirilmiştir. Tamamı $50 \times 17 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahip anten, GSM, UMTS, LTE ve WLAN kablosuz iletişim standartlarını desteklemektedir. Çift bantta çalışan anten, özdeş ve simetrik iki elemandan oluşmaktadır. Alt bant, 1500–2800 MHz ve üst bant 4700–8500 MHz frekans aralığını kapsamaktadır. $9,3 \times 22 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahip her eleman, açık uçlu halka şeritlerden oluşmaktadır. Anten elemanları arasında yüksek yalıtım sağlamak ve geniş bir empedans bant genişliği elde etmek için anten elemanları altında toprak düzlemde $12 \times 19 \text{ mm}^2$ boyutlarında iki adet özdeş ve simetrik açık uçlu halka şekilli iki kollu şeritler kullanılmıştır. Ayrıca, yalıtımı daha da artırmak için toprak düzlemde U şekilli iki adet şerit boşluklar oluşturulmuştur. Böylece, en az 15 dB’lik yalıtım seviyesi kazanılmıştır.



Şekil 13. Halka şekilli ÇGÇÇ anten geometrisi [22] (The geometry of ring-shaped MIMO antenna [22])

Li vd. [23] tarafından 2013 yılında önerilen çift bantlı ultra geniş bant (ultrawideband: UWB) bir ÇGÇÇ anten yapısı Şekil 14’te verilmiştir. Bilindiği gibi 3100–10600 MHz frekans aralığı ultra geniş bant olarak isimlendirilmektedir. MIMO anten yapısı, iki özdeş ve simetrik elemandan meydana gelmiştir. Her eleman bükülmüş iki koldan ve bu kolların arasına yerleştirilen şeritlerden oluşmuştur. Aradaki şeritlerden biri, 3300–3700 MHz bandını durdururken diğeri 5150–5850 MHz bandını durdurmaktadır. Anten elemanları, $27 \times 30 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki bir FR4 malzeme üzerinde tasarlanmıştır. $7,6 \times 11,5 \text{ mm}^2$

boyutlarındaki anten elemanları, aralarındaki yalıtımı artırmak için toprak düzlemdeki iki çıkıntıya bağlanmıştır. Ayrıca, toprak düzlemdeki iki çıkıntı, ince bir şerit ile birbirine bağlanmıştır. Anten tasarımı, küçük boyut ve bant genişliği açılarından ön plana çıkmaktadır.

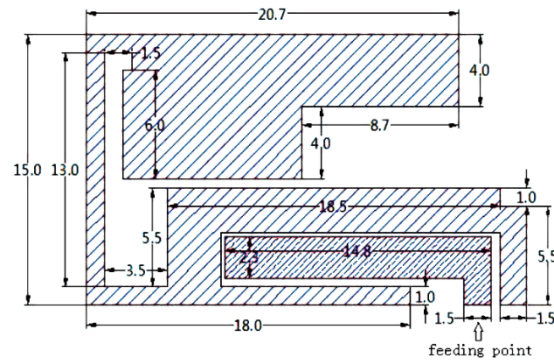


Şekil 14. İki kollu ÇGÇÇ anten geometrisi [23] (The geometry of MIMO antenna with two branches [23])

Şekil 15’de gösterilen özdeş ve simetrik iki elemanlı ÇGÇÇ anten, Li vd. [24] tarafından 2014 yılında kablosuz iletişim uygulamaları için önerilmiştir. Her elemanı $24.5 \times 15 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki ÇGÇÇ anten, 1710–2690 MHz (–6 dB için) bandından çalışmaktadır. Anten elemanlarının yapısı, kıvrılmış düzlemsel iki ışınıcıdan ve bir besleme parçasından meydana gelmiştir. Anten elemanları arasında yaklaşık 10 dB’lik bir yalıtım seviyesi sağlanmıştır.



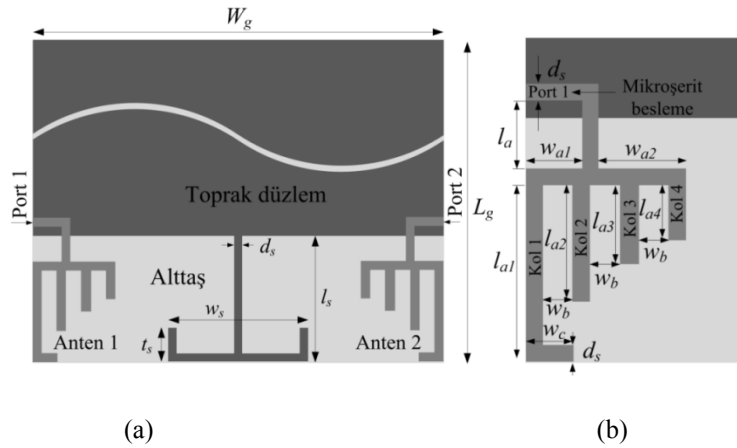
(a)



(b)

Şekil 15. Düzlemsel ÇGÇÇ anten geometrisi: a) genel görünüm, b) detaylı görünüm [24] (The geometry of planar MIMO antenna: a) general view, b) detailed view [24])

Toktaş ve Akdağlı [25] tarafından 2014 yılında, iki elemanlı kompakt, geniş bant bir ÇGÇÇ anten önerilmiştir. Anten, LTE, WiMAX ve WLAN bantlarını kapsayan 1790–3770 MHz geniş frekans aralığında çalışmaktadır. Anten geometrisi, Şekil 16’da gösterilmiştir. ÇGÇÇ anten yapısı, 10 x 17,7 mm² boyutlarına sahip simetrik olarak yerleştirilmiş iki özdeş elemandan ve toprak düzlemde T şekilli parasitik elemandan oluşmaktadır. Anten elemanları, bükülmüş mikroşerit beslemeli dört koldan meydana gelmektedir. T şekilli parasitik eleman kullanılarak, anten elemanları arasında en az 13 dB’lik bir yalıtım performansı elde edilmiştir.



(a)

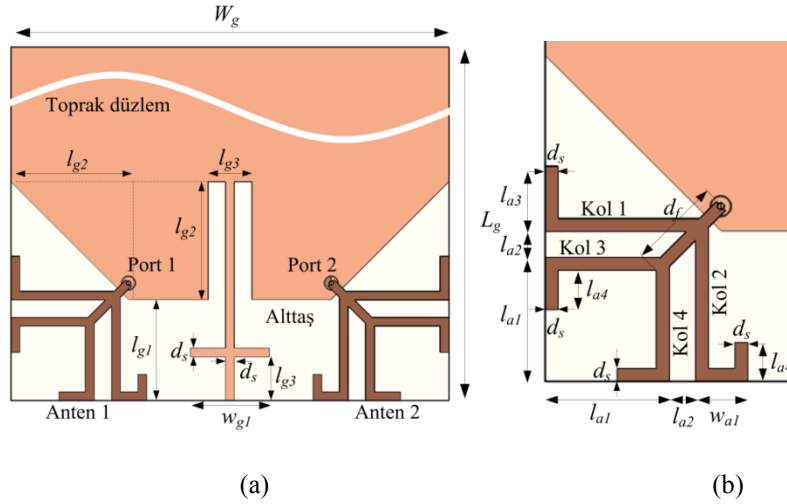
(b)

Şekil 16. Mikroşerit beslemeli dört kollu ÇGÇÇ anten geometrisi:

a) genel görünüm, b) detaylı görünüm [26] (The geometry of microstrip-fed MIMO antenna with four branches: a) general view, b) detailed view [25])

Şekil 17’de gösterilen geniş bant ÇGÇÇ anten, Akdağlı ve Toktaş [26] tarafından 2014 yılında tasarlanmıştır. Anten, LTE, WiMAX ve WLAN standartlarını destekleyen 1800–4000 MHz frekans aralığında çalışmaktadır. Anten yapısı, birbirine göre simetrik ve dikey olarak yerleştirilmiş 15,5 x 16,5 mm² boyutlarında özdeş düzlemsel iki elemandan oluşmaktadır. Anten elemanları, koaksiyel beslemeli

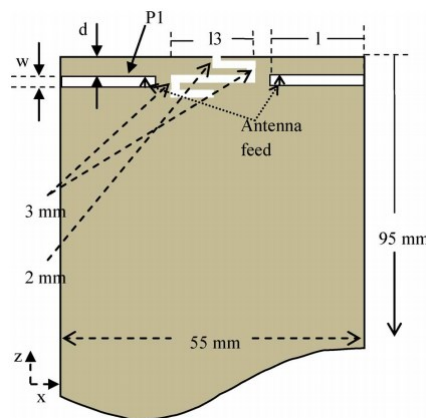
mikroşerit hatlı bükülmüş dört koldan meydana gelmiştir. Işıyan elemanların altındaki toprak düzlemin köşeleri üçgen olarak kesilmek suretiyle empedans bant genişliğinde önemli bir artış sağlanmıştır. Anten elemanları arasındaki yalıtımı artırmak için toprak düzleminde $9 \times 11,53 \text{ mm}^2$ boyutlarında artı-şekilli bir parasitik eleman önerilmiştir. Böylece, 10 dB'lik ilave bir yalıtım sağlanarak, anten elemanları arasında yaklaşık 20 dB'lik bir ortak etkileşim seviyesi elde edilmiştir.



Şekil 17. Geniş bant dikey ÇGÇÇ anten geometrisi: a) genel görünüm, b) detaylı görünüm [26] (The geometry of wideband orthogonal MIMO a) general view, b) detailed view [26])

3.2 ÇGÇÇ TFA Tasarımları (ÇGÇÇ TFA Designs)

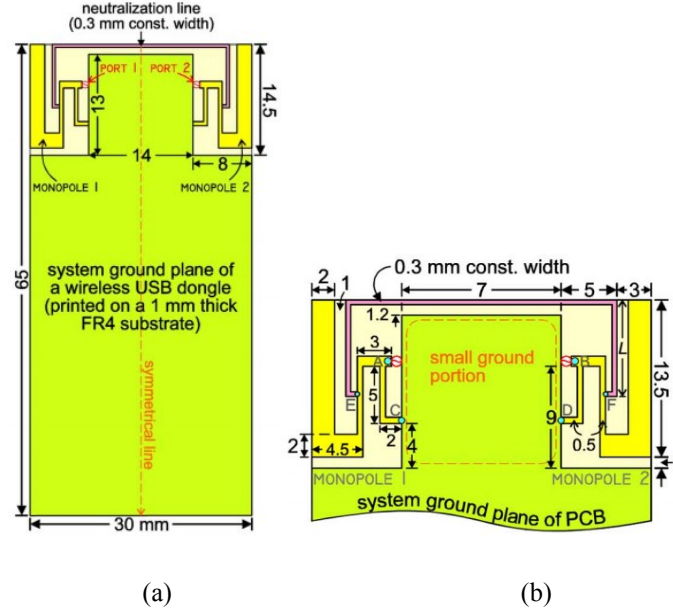
Şekil 18'de, WLAN uyumlu gezgin terminallere yönelik bir ÇGÇÇ TFA geometrisi, gösterilmiştir. 2400–2840 MHz frekansında çalışan anten, Ayatollahi vd. [27] tarafından 2012 yılında tasarlanmıştır. Anten, PCB kart üzerinde $1 \times 20 \text{ mm}^2$ boyutlarında çeyrek dalga boyuna sahip iki boşluktan ve bunların arasında 6×13 boyutlarında bükülmüş bir boşluktan meydana gelmiştir. Aradaki bükülmüş boşluk, hem empedans bant genişliğini, hem de anten elemanları arasındaki yalıtımı yaklaşık 7 dB artırarak 15 dB'e çıkarmaktadır.



Şekil 18. Boşluk açılarak oluşturulmuş ÇGÇÇ TFA geometrisi [27] (The geometry MIMO IFA with slots loaded [27])

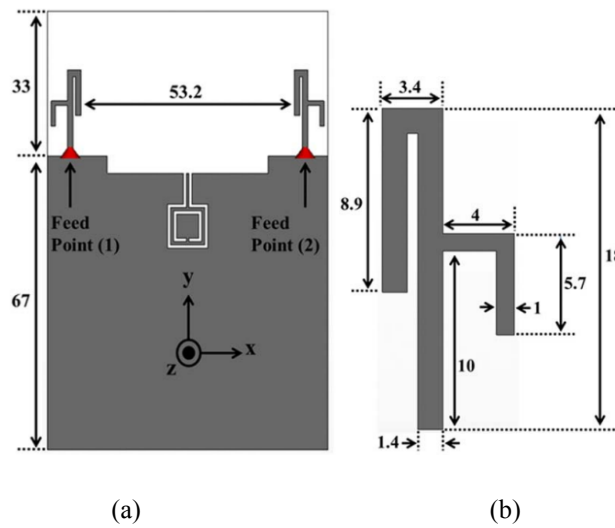
Bir diğer ÇGÇÇ TFA geometrisi, Şekil 19'da gösterilmiştir. $14,5 \times 30 \text{ mm}^2$ boyutlarındaki anten, Su vd. [28] tarafından 2012 yılında, 2400 MHz WLAN USB uygulamaları için tasarlanmıştır. Bükülmüş kol

şekilli özdeş iki anten elemanın bir gezgin kartın köşelerine simetrik yerleştirilmesiyle oluşturulan ÇGÇÇ dizisine, bir nötrleme şeridi eklenerek anten elemanları arasında 15 dB'lik bir yalıtım sağlanmıştır.



Şekil 19. Bükülmüş ÇGÇÇ TFA geometrisi: a) genel görünüm, b) detaylı görünüm [28] (The geometry of meandered MIMO IFA: a) general view, b) detailed view [28])

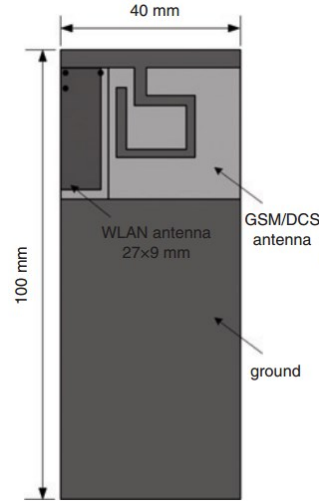
Yang vd. [29] tarafından 2014 yılında, WLAN standardını destekleyen 2450 ve 5200 MHz frekanslarında çalışan bir ÇGÇÇ TFA anten önermiştir. Şekil 20'de gösterilen antenin yapısı, simetrik olarak yerleştirilmiş $7,4 \times 18 \text{ mm}^2$ boyutlarında iki kolun birleşmesi ile oluşmuş, özdeş iki elemandan ve anten elemanları arasındaki yalıtımı artırmak için iki eleman ortasında, $10 \times 17 \text{ mm}^2$ boyutlarında iç içe geçmiş dikdörtgen halka şeklindeki ince iki boşluktan oluşmaktadır. Anten elemanları arasında en az 15 dB'lik bir ortak etkileşim seviyesi bulunmaktadır.



Şekil 20. İki kollu ÇGÇÇ TFA geometrisi: a) genel görünümü, b) anten elemanının detaylı gösterimi [29] (The geometry of MIMO IFA with two branches: a) general view, b) detailed view of antenna element [29])

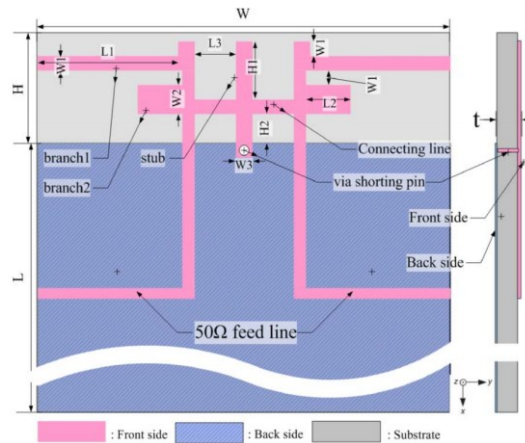
3.3 ÇGÇÇ DTFA Tasarımları (ÇGÇÇ DTFA Designs)

Li, vd. [30] tarafından 2009 yılında, GSM ve WLAN uygulamaları için tasarlanan ÇGÇÇ anten geometrisi, Şekil 21’de verilmiştir. Anten yapısı temel olarak, 40×29 ve 9×27 mm² boyutlarında iki DTFA’dan oluşmaktadır. Birinci anten, GSM900/1800 MHz bandında, diğeri, WLAN/2400 MHz bandında çalışmaktadır (–6 dB seviyesi için). Anten elemanları arasındaki yalıtımı artırmak için iki teknik kullanılmıştır: Birinci teknikte, koaksiyel besleme kablosunun dış iletkeni kısa devre şeridi gibi kullanılmıştır; ikinci teknikte ise GSM bandını sağlayan ışığıcıda dikdörtgen bir boşluk açılmıştır. Böylece, 800–2600 MHz frekans aralığında 20 dB’lik yalıtım seviyesi sağlanmıştır.



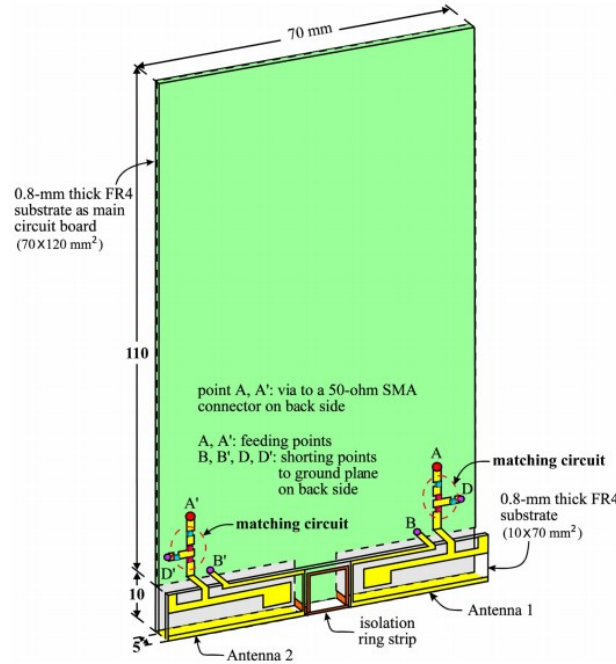
Şekil 21. İki elemanlı ÇGÇÇ DTFA geometrisi [30] (The geometry of MIMO PIFA with two elements [30])

Ling ve Li [31] tarafından 2011 yılında sunulan çalışmada, gezgin cihazlar için çift bantlı bir ÇGÇÇ DTFA önerilmiştir. Anten geometrisi, Şekil 22’de verilmiştir. 15×50 mm² boyutlarında olan anten dizisi, 2450 ve 5800 MHz bantlarını kapsamaktadır (–6 dB seviyesi için). ÇGÇÇ anten dizisi, simetrik olarak yerleştirilmiş bükülmüş iki kollu özdeş elemanlardan oluşmaktadır. Anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için kısa devre pini ve nötrleme şeridi kullanılmıştır.



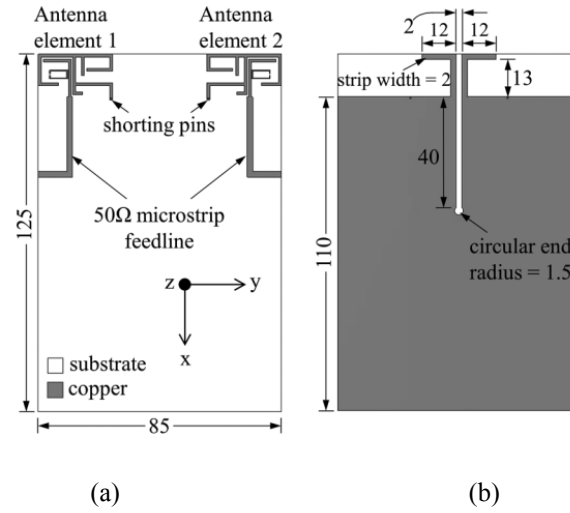
Şekil 22. Kısa devre nötrleme şeritli ÇGÇÇ DTFA geometrisi [31] (The geometry of MIMO PIFA with shorted neutralization line [31])

Wong vd. [32] tarafından 2013 yılında önerilen çift bantlı ÇGÇÇ DTFA geometrisi, Şekil 23'de verilmiştir. WLAN ve LTE uygulamalarına uyumlu tasarlanan anten, özdeş ve simetrik $10 \times 30 \text{ mm}^2$ boyutlarında iki elemandan ve ikisinin arasında yalıtımı artırmak için $9 \times 9 \text{ mm}^2$ boyutlarında kısa devre yapılmış bir dikdörtgen halkadan oluşmaktadır. Anten dizinin genel boyutları $10 \times 70 \text{ mm}^2$ 'dir. GSM 850/900, GSM 1800/1900 ve UMTS/LTE 2300/2500 bantları için tasarlanan anten, 824–960 ve 1710–2690 MHz frekans aralıklarını kapsamaktadır. Anten elemanları arasında en az 15 dB'lik bir yalıtım seviyesi sağlanmıştır.



Şekil 23. Yalıtım halkalı ÇGÇÇ DTFA geometrisi [32] (The geometry of MIMO PIFA with neutralization ring [32])

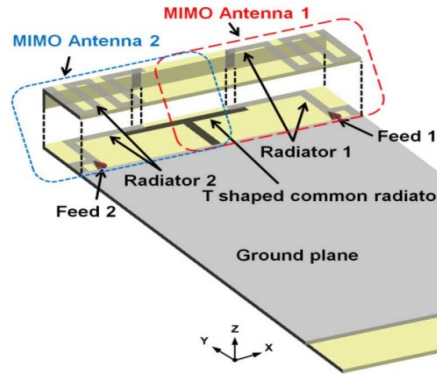
Şekil 24'de gösterilen özdeş iki elemanlı, çok bantlı ÇGÇÇ anten çalışması, Shoaib vd. [33] tarafından 2014 yılında literatüre sunulmuştur. Anten, GSM850/900, DCS, PCS, UMTS, WLAN ve WiMAX standartları olan 900, 1800, 2100, 3500 ve 5400 MHz frekans bantlarında çalışmaktadır. $16 \times 26.3 \text{ mm}^2$ boyutlarına sahip antenin elemanları, 900 MHz 'de $0.097\lambda_0$ aralıkla simetrik olarak yerleştirilmiştir ve her eleman, mikroşerit beslemeli bükülmüş kollardan oluşmaktadır. Anten elemanları arasında yalıtımı artırmak için toprak düzleminde, ortası şerit boşluklu bir T şekilli parasitik eleman geliştirilmiştir. Böylece, çalışma bantlarında en az 15 dB yalıtım seviyesi sağlanmıştır.



Şekil 24. Mikroşerit beslemeli bükülmüş kollardan oluşmuş ÇGÇÇ anten geometrisi:

a) önden görünüm, b) arkadan görünüm [33] (The geometry of microstrip-fed MIMO antenna consisting meandered branches: a) front view, b) back view [33])

Lee vd. [34] tarafından 2014 yılında LTE 13 bandı (746–787 MHz) için iki elemanlı bir ÇGÇÇ DTFA önerilmiştir. $60 \times 15 \times 5 \text{ mm}^3$ boyutlarında olan antenin geometrisi, Şekil 25’te verilmiştir. Anten, simetrik ve özdeş iki DTFA elemanından ve toprak düzleminde bir T şekilli parasitik elemandan oluşmaktadır. Anten elemanları zikzak olarak bükülmüş mikroşerit hattı oluşmaktadır. Parasitik eleman kullanılarak anten elemanları arasında yaklaşık 20 dB’lik bir yalıtım seviyesi elde edilmiştir.



Şekil 25. Zikzak elemanlı ÇGÇÇ DTFA geometrisi [34] (The geometry of MIMO PIFA with zigzag elements [34])

3.4 ÇGÇÇ Anten Tasarımlarının Karşılaştırılması (Comparison of MIMO Antenna Designs)

Gezgin terminaller için literatürde önerilmiş bazı ÇGÇÇ anten tasarımlarının yapısal ve karakteristik özellikleri yukarıda verilmiştir. Bu bölümde, anten tasarımları; geometrik şekilleri, boyutları, destekledikleri frekans bantları ve genişlikleri, yalıtım seviyesi ve anten elemanları arasındaki ortak etkileşimi azaltmak için kullanılan teknikler açısından detaylı olarak karşılaştırılmıştır. Karşılaştırma

sonuçları, Çizelge 1’de verilmiştir. Anten tasarımları, genel olarak bu kriterler açısından kendi içinde farklılıklar içermektedir. Bazı tasarımlar, yüksek performanslı olmasına rağmen, geometrileri karışık ve anten boyutları nispeten büyük olabilmektedir. Öte yandan, bazı antenler küçük olmakla birlikte dar bant genişliğine sahip ve yalıtım seviyesi yüksek olabilmektedir. Mesela, Ayatollahi vd. [27] tarafından önerilen ÇGÇÇ anten, basit ve kompakt bir geometriye sahip olmakla birlikte dar bant genişliğine sahiptir. Diğer taraftan, Li, vd. [30] tarafından tasarlanan anten, 900, 1800 ve 2400 MHz çoklu bant desteğine sahip olmasına rağmen yapısal olarak nispeten büyüktür. Bu arada, [20, 24, 30, 31]’de önerilen antenlerin bant genişlikleri -6 dB seviyesinde ölçüldüğü dikkate alınmalıdır. Kompakt tasarım, küçük boyut, geniş veya çoklu bant desteği olan ve yüksek yalıtım gibi özelliklere sahip ÇGÇÇ anten tasarımları literatürde az olmakla birlikte, bu derleme çalışmasında değerlendirilen anten tasarımlarından, [21, 23, 25-27, 32, 33]’de sunulan tasarımlar bu açıdan ön plana çıktığı söylenilebilir.

Çizelge 1. Gezgin cihazlar için ÇGÇÇ anten tasarımlarının karşılaştırılması (Comparison of MIMO antenna designs for mobile handsets)

Kay. No:	Anten tipi	Anten elemanları				Yalıtım yöntemi			Çalışma frekansı (MHz –10 dB için)	Min. yalıtım seviyesi (dB)
		Dizilişi	Yapısı	Boyutlar (mm ²)	h (mm); ϵ_r	Yeri	Yapısı	Boyutları (mm ²)		
[20]	D	İ, Ö, S	4 şekilli şerit	17,5 x 86,45	1,56; 4,4	TD	Birleşmiş iki kol ve spiral şekilli şerit	11 x 52	803–823 ^a ; 2440–2900 ^a	17
[21]	D	İ, Ö, S	Mikroşerit beslemeli bükülmüş U şekilli iki kol	15 x 18	1,6; 4,4	TD	Üçgen iki ince boşluk ve bir şerit	10 x 13,5; 1 x 18	2400–6550	18
[22]	D	İ, Ö, S	Açık uçlu halka şerit	9,3 x 22	0,8; 4,4	TD	Açık uçlu halka şekilli iki şerit ve bunların arasında U şekilli iki boşluk	12 x 19	1500–2800; 4700–8500	15
[23]	D	İ, Ö, S	Mikroşerit beslemeli iki kol ve kolları birleştiren iki şerit	7,6 x 11,5	0,8; 4,4	TD	4 x 14 mm ² boyutlarındaki boşlukta bir şerit	0,3 x 4,0	3100–10600 ^b	20
[24]	D	İ, Ö, S	Kıvrılmış düzlemsel ışıyıcı ve bir besleme parçası	24,5 x 15	1,2; 4,4	–	–	–	1710–2690 ^a	10
[25]	D	İ, Ö, S	Bükülmüş mikroşerit beslemeli dört kolun birleşmesi	10 x 17,7	1,6; 4,4	TD	T şekilli bir şerit	15 x 17	1790–3770	13
[26]	D	İ, Ö, S	Koaksiyel beslemeli mikroşerit hatlı bükülmüş dört kolun birleşmesi	15,5 x 16,5	1,6; 4,4	TD	Artı-şekilli bir şerit	9 x 11,53	1800–4000	20
[27]	TFA	İ, Ö, S	Çeyrek dalga uzunluğunda bir boşluk	1 x 20	1,5; 4,4	TD	Bükülmüş bir boşluk	6 x 13	2400–2840	15
[28]	TFA	İ, Ö, S	Bükülmüş bir kol	8 x 14,5	1; 4,4	TD	Nötrleme şeridi	0,3 x 25	2370–2490	15
[29]	TFA	İ, Ö, S	Bükülmüş iki kolun birleşmesi	7,4 x 18	–; 3,55	TD	İç içe geçmiş dikdörtgen halka şekilli iki şerit boşluk	10 x 17	2450 ^c ; 5200 ^c	18
[30]	DTFA	İ	Birinci eleman, ince bükülmüş boşluklu dikdörtgen (900/1800 MHz için) ve diğeri dikdörtgen (2400 MHz için)	40 x 29; 9 x 27	8; 1	ID	Kısa devre ve boşluk açma	–	900 ^{a,c} ; 1800 ^{a,c} ; 2400 ^{a,c}	20
[31]	DTFA	İ, Ö, S	Bükülmüş iki kol	15 x 50	0,8; 4,4	ID	Kısa devre yapılmış nötrleme şeridi	2 x 12	2450 ^{a,c} ; 4800 ^{a,c}	20
[32]	DTFA	İ, Ö, S	Kısa devre yapılmış iki bükülmüş kol	10 x 70	0,8; 4,4	ID	Kısa devre yapılmış halka şerit	9 x 9	824–960; 1710–2690	15
[33]	DTFA	İ, Ö, S	Mikroşerit beslemeli bükülmüş kollar	16 x 26,3	0,8; 4,4	TD	Ortası şerit boşluklu bir T şekilli şerit	15 x 26	826–1005; 1527–2480; 3439–3690; 5340–5749	15
[34]	DTFA	İ, Ö, S	Zikzak olarak bükülmüş şerit ($h = 5$ mm)	23 x 15	5; 4,4	TD	T şekilli bir şerit	15 x 27	746–787	20

Düzlemsel (D), iki elemanlı (İ), özdeş (Ö), simetrik (S), toprak düzlem (TD), ışıma düzlemi (ID), ters F anten (TFA), düzlemsel ters F anten (DTFA)

^a –6 dB için; ^b 3300–3700 MHz ve 5150–5850 MHz frekans aralığında bant durduran özelliğe sahiptir; ^c Dar bant genişliğine sahiptir

4. Sonuçlar (Conclusions)

Kablosuz iletişim sistemlerinde kullanılan, zaman, frekans ve kod çoğullama tekniklerine ilave olarak uzaysal çoğullama ile veri iletim kapasitesinin ve veriminin artmasına imkân sağlayan ÇGÇÇ sistemlerinin son yıllarda kullanılmaya başlanması, modern kablosuz iletişim sistemlerinde çok önemli bir dönüm noktası olmuştur. 2005 yılından sonra iletişim sistemlerine adapte edilmeye başlanan ÇGÇÇ sistemlerinin verimli çalışması, uzaysal ara yüzün en önemli elemanları olan anten tasarımlarına bağlıdır. Bu nedenle, literatürde yüksek performanslı ÇGÇÇ anten tasarımlarına gereksinim duyulmaktadır. Bu derleme çalışmasında, öncelikle, mikroşerit anten tipleri, ÇGÇÇ antenler ve anten elemanları arasındaki elektromanyetik yalıtımı artırmak için kullanılan teknikler anlatılmıştır. Sonra, gezgin cihazlar için literatürde önerilmiş bazı ÇGÇÇ anten tasarımları incelenmiş ve detaylı bir karşılaştırma yapılmıştır. Bu anten çalışmalarında genel olarak, özdeş ve simetrik iki elemanlı anten yapıları tercih edilmiştir. Antenlerin, günümüz GSM, LTE, WiMAX ve WLAN kablosuz standartlarına ait bantları desteklemek amacıyla tasarlandıkları görülmüştür. Anten çalışmaları; geometri, boyut, bant genişliği ve desteklediği bantlar, anten elemanları arasındaki yalıtım gibi performans kriterleri açılarından kendi içinde farklılıklar göstermekle birlikte, küçük, geniş bant, yüksek yalıtımlı ve çoklu kablosuz standartların bantlarını destekleyen anten tasarımlarının az olduğu görülmüştür. Yine de, bu performans kriterleri açılarından ön plana çıkan tasarımlar belirlenmeye çalışılmıştır. Son olarak, ÇGÇÇ antenlerin kullanımının 2010 yılından sonra başladığı ve her geçen gün kullanımının arttığı göz önüne alındığında, hızla gelişen teknolojinin bu anten tasarımlarına ihtiyacı devam edecektir.

Kısaltmalar (Abbreviations)

CDMA	Code Division Multiple Access
ÇGÇÇ	Çok Girişli Çok Çıkışlı
CPW	Coplanar Waveguide
D-BLAST	Diagonal-Bell Laboratories Layered Space-Time
DTFM	Düzlemsel Ters F Anten
EDD	Eş-Düzlemsel Dalga Kılavuzu
EDGE	Enhanced Data Rates for GSM Evolution
GPRS	General Packet Radio Service
GSM	Global System for Mobile Communications
HSPA	High Speed Packet Access
IFA	Inverted F antenna
LTE	Long Term Evolution
MIMO	Multiple Input Multiple Output
OFDMA	Orthogonal Frequency Division Multiplexing Access
PIFA	Planar Inverted F Antenna
TDMA	Time Division Multiplexing Access
TFA	Ters F Anten
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System
UWB	Ultrawideband
V-BLAST	Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time
W-CDMA	Wideband-Code Division Multiple Access
WiMAX	Worldwide Interoperability for Microwave Access
WLAN	Wireless Local Area Network

Kaynaklar (References)

1. Alamoutvevei, S.M. (1998). A simple transmit diversity technique for wireless communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. Cilt 16, no 8, 451–458
2. Tarokh, A.R.C.V. and Seshadri, N. (1998). Space time codes for high data rate communication: performance criteria and codeconstruction. *IEEE Transactions Information Theory*. Cilt 44, no 2, 744–764
3. Brennan, D.G. (2003) “Linear diversity combining techniques”, Proceedings of the IEEE, Cilt 91, no 2, 331–356
4. Isomaki, P. and Isoaho, J. (2008) On diversity combining. *Technical Report, TUCS Communication Systems Laboratory*. no 884
5. Foschini, G.J. and Gans, M.J. (1998) On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas. *Wireless personal communications*. Cilt 6, 311–335
6. Wolniansky, P.W., Foschini, G.L., Golden, R.A. and Valenzuela, R.A. (1998) V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel. *URSI International Symposium on Signals, Systems, and Electronics*. ISSSE 98, 295–300
7. Foschini, G.J. (1996) Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Technical Journal*. Cilt 1, no 2, 41–59
8. Gore, D.A. and Paulraj, A.J. (2002) MIMO antenna subset selection with space-time coding, *IEEE Transaction on Signal Processing*, Cilt 50, no 10, 2580–2588
9. Gorogkhov, A., Gore, D.A. and Paulraj, A.J. (2003) Receive antenna selection for MIMO spatial multiplexing: theory and algorithms. *Transaction on Signal Processing*. Cilt 51, no 1, 2796–2708
10. Win, M.Z. and Winters, J. H. (1999) Analysis of hybrid selection/maximal-ratio combining in rayleigh fading. *IEEE Transactions on Communications* Cilt 47, no 12, 1773–1776
11. Tse, D. ve Wiswanath, P. (2005) *Fundamentals of wireless communication*. Cambridge University Press
12. Tse, D.N.C. and Wiswanath P. (2004) Diversity–multiplexing tradeoff in multiple-access. *Transaction on Signal Processing*. Cilt 50, no 9, 1859–1874
13. E-UTRA–Evolved Universal Terrestrial Radio Access, <http://en.wikipedia.org/wiki/E-UTRA>, (2014)
14. Hanzo, L., Akhtman, Y., Wang, L. and Jiang, M. (2011) *MIMO –OFDM for WIFI and WiMAX*. John Wiley & Sons Ltd.
15. Kaise, T. and Zheng, F. (2010) *Ultra wideband systems with MIMO*. John Wiley & Sons Ltd.
16. Balanis, C.A. and Loannides, P.I. (2007) *Introduction to smart antennas*. Morgan & Claypool
17. Mallahzadeh, A.R., Es'haghi, S. and Alipour, A. (2009) Design of an E-shaped MIMO antenna using IWO algorithm for wireless application at 5.8 GHz. *Progress in Electromagnetics Research*. Cilt 90, 187–203
18. Li, Z., Du, Z., Takahashi, M., Saito, K. and Ito, K. (2012) Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Cilt 60, no 2, 473–481
19. Zhang, S., Lau, B. K., Tan, Y., Ying, Z. and He, S. (2012) Mutual coupling reduction of two DTFAs with a T-Shape slot impedance transformer for MIMO mobile terminals. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Cilt 60, no 3, 1521–1531
20. Sharawi, M.S., Numan, A.B., Khan, M.U. and Aloï, D.N. (2012) A dual-element dual-band MIMO Antenna system with enhanced isolation for mobile terminals. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Cilt 11, 1006–1009
21. Li; J-F., Chu, Q.-X., and Huang, T.-G. (2012) A compact wideband MIMO antenna with two novel bent slits. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Cilt 60, no 2, 482–489



22. Zhou, X., Quan, X.L. and Li, R.L. (2012) A dual-broadband MIMO antenna system for GSM/UMTS/LTE and WLAN handsets. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Cilt 11, 551–554
23. Li, J.-F., Chu, Q.-X., Li, Z.-H. and Xia, X.-X. (2013) Compact dual band-notched UWB MIMO antenna with high isolation. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Cilt 61, no 9, 4759–4766
24. Li, W., Lin, W. and Yang, G. (2014) A compact MIMO antenna system design with low correlation from 1710 MHz to 2690 MHz", *Progress In Electromagnetics Research*, Cilt 144, 59–65
25. Toktas A. and Akdagli A. (2014) Wideband MIMO antenna with enhanced isolation for LTE, WiMAX and WLAN mobile handsets. *Electronics Letters*. Cilt 10, no 50, 723–724
26. Akdagli A. and Toktas A. (2014) Design of wideband orthogonal MIMO antenna with improved correlation using parasitic element for mobile handset. *International Journal of Microwave and Wireless Technologies*. Cilt FirstView, 1–7
27. Ayatollahi, M., Rao, Q. and Wang, D. (2012) A compact, high isolation and wide bandwidth antenna array for long term evolution wireless devices. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Cilt 60, no 10, 4960–4963
28. Su, S.-W., Lee, C.-T. and Chang, F.-S. (2012) Printed MIMO-antenna system using neutralization-line technique for wireless USB-dongle applications. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. Cilt 60, no 2, 456–463
29. Yang, D.-G., Kim, D. O. and Kim, C.-Y. (2014) Design of dual-band MIMO monopole antenna with high isolation using slotted CSRR for WLAN. *Microwave and Optical Technology Letters*. Cilt 56, no 10, 2252–2257
30. Li, J.F., Sun, B.-H; Zuo, S.L. and Liu, Q.Z. (2009) Design of combined DTFAs with high port-to-port isolation for GSM/DCS and WLAN mobile phones. *Electronics Letters*. Cilt 45, no 11, 532–533
31. Ling, X. and Li, R. (2011) A novel dual-band MIMO antenna array with low mutual coupling for portable wireless devices. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Cilt 10, 1039–1042
32. Wong, K.-L., Lin, P.-W. and Hsu, H.-J. (2013) Decoupled WWAN/LTE antennas with an isolation ring strip embedded there between for smartphone application. *Microwave and Optical Technology Letters*. Cilt 55, no 7, 1470–1476
33. Shoaib, S., Shoaib, I., Shoaib, N., Chen, X. and Parini, C. G. (2014) Design and performance study of a dual-element multiband printed monopole antenna array for MIMO terminals. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Cilt 13, 329–332
34. Lee, B., Harackiewicz, F.J. and Wi, H. (2014) Closely Mounted Mobile Handset MIMO Antenna for LTE 13 Band Application. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. Cilt 13, 411–414
35. Kumar, G. and Ray, K.P. (2003) *Broadband microstrip antennas*. USA, Artech House
36. Wong, K.L. (2002) *Compact and broadband microstrip antennas*. John Wiley & Sons, Inc.
37. Yao, Y., Wang, X. and Yu, J. (2012) Multiband planar monopole antenna for LTE MIMO system. *International Journal of Antennas and Propagation*. Cilt 2012, 1-6