

5G Milimetre Dalga Uygulamaları için Çift Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı

Dual Band Frequency Selective Surface Design for 5G Millimeter-Wave Applications

Ufuk Şahin¹, Nurhan Türker Tokan²

^{1,2}Elektronik ve Haberleşme Mühendisliği
Yıldız Teknik Üniversitesi

ufuk.sahin1@std.yildiz.edu.tr, nturker@yildiz.edu.tr

Özet

Bu çalışmada 5G milimetre dalga iletişiminin bant gereksinimlerini karşılamak amacıyla çift bantlı frekans seçici yüzey tasarımı sunulmuştur. Özgün olarak tasarlanan çift bantlı frekans seçici yüzeyin tasarım parametreleri ve analiz sonuçlarına yer verilmiştir. Çift bantlı frekans seçici yüzeyin tam dalga analiz aracı ile elde edilen benzetim sonuçları irdelenmiştir. Benzetimler Computer Simulation Technology (CST) ile gerçekleştirilmiştir. Frekans seçici yüzeylerin polarizasyon ve açısal kararlılığı için de analiz yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. Tasarımı yapılan frekans seçici yüzeyin, 5G milimetre dalga frekans bantları içerisinde yer alan 24.75 – 25.25GHz ve 37.60 – 40.00GHz frekans aralıklarında çalışması hedeflenmiştir. Benzetim sonuçlarıyla, tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının bu bantlarda çalıştığı gösterilmiştir.

Abstract

In this study, the design of a dual-band frequency-selective surface is presented to meet the band requirements of 5G millimetre-wave communication. In addition, the design parameters and analysis results of the originally designed frequency-selective dual-band surface are given. Simulation results obtained using the full-wave analysis tool of the frequency-selective dual-band surface are also examined. These simulations were performed using Computer Simulation Technology (CST). Furthermore, the polarisation and angular stability of the frequency selective surfaces were also analysed and the results were compared. The designed frequency selective surface is aimed to operate in the frequency ranges of 24.75 - 25.25GHz and 37.60 - 40.00GHz within the 5G millimetre wave frequency bands. Finally, the simulation results have shown that the designed frequency-selective surface structure works in these bands.

1. Giriş

Gelişen teknoloji ile ortaya çıkan ihtiyaçlar neticesinde haberleşme alanında yeni atılımlar yaşanmaktadır. Yüksek hız, yüksek verimlilik, düşük gecikme süresi gibi özelliklerinden dolayı günümüzde beşinci nesil (5G) haberleşme büyük önem kazanmaktadır [1]. Bunlara ek olarak 5G teknolojisi, makinelerin

haberleşmesi, nesnelerin interneti, akıllı ev ve şehir sistemleri gibi uygulamaları daha etkin kılmayı amaçlamaktadır [2]. Tüm bu hedefler ve amaçlar sonucunda 5G uygulamaları için en uygun materyal ve bileşenlerin tasarlanması için araştırmalar hız kazanmıştır.

5G teknolojisinde hedeflenen uygulamalar, gündem dışı kalan bazı araştırma konularını ön plana çıkarmıştır. 5G teknolojisine küresel geçiş ile birlikte, yüksek maliyeti ve tasarım zorluğu gibi olumsuz özellikleri sebebiyle tercih edilmeyen milimetre dalga boylarının kullanılması tekrar gündeme gelmiştir. Milimetre dalga boylarında tahsis edilen frekanslarda çalışan antenlerin kompakt, düşük maliyetli, geniş bantlı ve çok bantlı olması hedeflenmektedir. Antenlerde koruyucu radom olarak frekans seçici yüzeylerin kullanımı hedeflenen frekanslarda elektromagnetik dalganın iletimine, diğer frekanslarda ise geçişinin engellenmesine olanak sağlayacaktır. Bu şekilde, elektromanyetik dalganın iletimi ve yansımaları kontrol edilebilmektedir.

Frekans seçici yüzeyler (FSY) mikrodalga ve milimetre dalga frekanslarında çeşitli amaçlarla kullanılabilir. FSY dielektrik tabaka ve tabakanın üzerine basılan metal yüzeylerin dizilimiyle oluşmaktadır. Frekans seçici yüzeyler, kullanılan malzeme türüne, dielektrik malzemenin kalınlığına, elektromanyetik dalganın polarizasyon tipine ve geliş açısına, metalik şekillerin geometrisi ve periyodikliğine göre farklı karakteristiğe sahiptir [3].

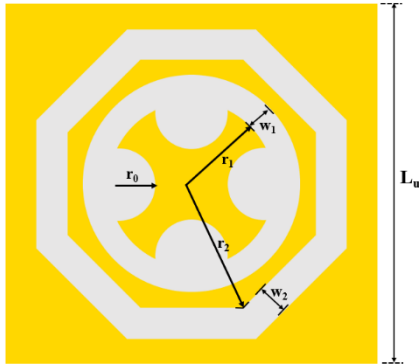
Bu çalışmada 5G milimetre dalga uygulamaları için çift bantlı frekans seçici yüzey tasarımı hedeflenmiştir. İki farklı 5G milimetre dalga frekansında çalışan, özgün bir FSY birim hücresi geliştirilmiştir. Birim hücre 3.8 mm × 3.8 mm (en × boy) ölçülerinde olup 0.51 mm kalınlığındaki dielektrik malzeme üzerinde kalınlığı 17.5 µm olan bakır plaka kullanılarak oluşturulmuştur. Özgün birim hücreler 40×40 adet olacak şekilde periyodik olarak yerleştirilerek özgün frekans seçici yüzey tasarlanmıştır. Tasarımı yapılan özgün frekans seçici yüzeyin sonuçları incelenmiştir.

2. 5G Milimetre Dalga Frekansları için Çift Bantlı Özgül Birim Hücre Modeli

Frekans seçici yüzeyler bant geçiren veya bant durduran filtre olarak tasarlanabilmektedir. Frekans seçici yüzeylerin yansıma katsayısı ve iletim katsayısı parametreleri ile karakteristiği irdelenir. Hedeflenen frekans aralığında düşük yansımaya ve yüksek iletime sahip olması hedeflenmektedir. Bu sebeple S_{11} ve S_{22} 'nin -10 dB'nin altında olmasına önem verilmektedir. S_{21} ve S_{12} parametrelerinin ise hedeflenen frekans bandında kaliteli iletim için yüksek bir değere sahip olmasına özen gösterilmektedir.

Tasarımı yapılan FSY'nin birim hücre analizleri CST Microwave Studio tam dalga analiz aracı yardımıyla yapılmıştır. Benzetimde S-parametreleri elde edilebilmektedir. Benzetimler yapılırken z-eksenine dik olarak yerleştirilmiş birim hücre, iletkeni $z=0$ düzleminde yer alacak şekilde konumlandırılmıştır. Birim hücre, +z ve -z doğrultusunda bulunan, birinci rezonans frekansında $\lambda/6$ uzaklığa yerleştirilen iki port ile uyarlılmaktadır. Birim hücrelerin analizinde x-ekseni ve y-ekseni boyunca olan sınırlarda birim hücre sınırı kullanılarak bu eksenler boyunca sonsuz tekrarlayan yapının eşdeğer sonuçları elde edilmiştir. Ek olarak z-eksenine dik olan sınırlarda ise açık sınır koşulu kullanılmıştır.

Çift bantlı bant geçiren filtre olarak çalışacak şekilde tasarlanan FSY ile kararlı sonuçlar elde edebilmek ve 5G uygulama bantlarında geçirgenlik özelliği sağlayabilmek hedeflenmiştir. Tasarlanan birim hücre yapısı Şekil 1'de verilmiştir. Şekil 1 üzerinde birim hücreye dair fiziksel parametreler gösterilmiştir.



Şekil 1: Çift bantlı birim hücre yapısı.

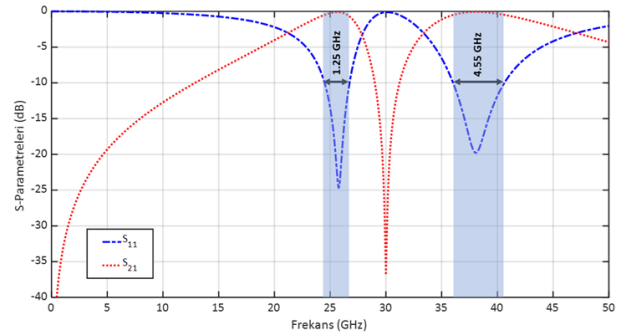
Özgün frekans seçici yüzey yapısının 5G uygulamalarında kullanılması hedeflenmektedir. Bu sebeple birim hücrenin parametreleri, 5G uygulama frekans bantlarını kapsayacak şekilde elde edilmiştir. Bunun için birim hücrenin parametrelerine optimizasyon prosedürü uygulanarak ilgili bant içerisinde rezonans yapması sağlanmıştır. Çift bantlı birim hücre analizinde ITU tarafından 5G uygulamaları için tahsis edilen, 24.75 – 25.25 GHz bandında 500MHz ve 37.60 – 40.00 GHz bandında 2.4 GHz bant aralıkları hedeflenmiştir [4]. Çift bantlı birim hücre tasarımında taban malzemesi olarak düşük kayıplı, kalınlığı 0.51 mm, dielektrik sabiti $\epsilon_r=2.2$ ve kayıp tanjantı 1GHz'de $\tan\delta = 0.0009$ olan DiClad880 tercih edilmiştir. İletken yüzey bakır ($\sigma=5.96 \times 10^7$ S/m) olup 17.5 μm kalınlığa sahiptir. Bu frekans bantlarında çalışan birim hücrenin parametrelerinin değerleri Çizelge 1'de yer almaktadır.

Çizelge 1: 5G milimetre frekansları için tasarlanan çift bantlı birim hücrenin fiziksel boyutları

Parametreler	Değerler (mm)
L_u	3.80
w_1	0.20
w_2	0.30
r_0	0.50
r_1	1.05
r_2	1.45

2.1. Yansıma ve İletim Katsayıları

Çift bantlı birim hücrenin S-parametreleri Şekil 2'de sunulmuştur. Grafik incelendiğinde çift bantlı, bant geçiren filtre özelliği sergilediği görülmektedir. S_{11} parametresinden anlaşıldığı üzere, birim hücre 25.7 GHz ve 38.1 GHz frekanslarında rezonansa girmekte, bant geçiren özellik taşıdığı gözlenmektedir. Birim hücre analizinin parametrik analizi yapılmıştır. Analiz sonuçlarına göre, sekizgen yarığı tanımlayan r_2 ve w_2 parametrelerinin değişimi birinci rezonansın bant genişliğini doğrudan etkilemektedir. Çember formundaki yarığı tanımlayan r_1 ve w_1 parametrelerinin değişimi ise ikinci rezonans frekansını etkilemektedir.



Şekil 2: Çift bantlı birim hücrenin yansıma ve iletim katsayıları.

Şekil 2 üzerinde gösterilen mavi bölgeler, birim hücrenin çalışma frekans bantlarını göstermektedir. Çift bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin S-parametrelerinden S_{11} yansıma katsayısına bakıldığında, ilk rezonans için -10 dB'de bant genişliğinin 24.50 – 26.75 GHz aralığında olduğu görülmektedir. Bu aralık, 5G iletişim bandı olan 24.75 – 25.25 GHz frekans aralığını kapsamaktadır. İlk rezonans için -24.80 dB'ye kadar geri dönüş kaybı gözlenmektedir. İkinci rezonans için bant genişliğinin 36.05 – 40.60 GHz olduğu görülmektedir. Simülasyon ile elde ettiğimiz bant genişliğinin -10 dB'de 2.4 GHz bant genişliğinden daha büyük (4.59 GHz) olduğu görülmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının büyük frekanslarda daha büyük bant genişliği sağlaması 5G uygulamaları için istenilen bir durumdur. Çizelge 2'de çift bantlı frekans seçici yüzey yapısının frekans yanıtı 5G için hedeflenen bant aralıkları ile birlikte özetlenmiştir.

Çizelge 2: 5G milimetre dalga iletişiminin bant gereksinimleri ve çift bantlı birim hücrenin frekans yantı

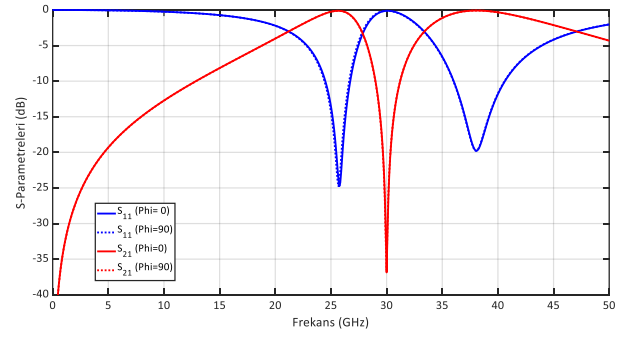
Bant No	Ayrılan Bant (GHz)	5G için Gerekli Bant Genişliği	FSS Bandı (GHz)	FSS Rezonans Frekansı	FSS Bant Genişliği
Bant 1	24.75 – 25.25	500 MHz	24.50 – 26.75	25.7 GHz	1.25 GHz
Bant 2	37.60 – 40.00	2.4 GHz	36.05 – 40.60	38.1 GHz	4.55 GHz

2.2. Polarizasyon ve Geliş Açısı Kararlılığı

Frekans seçici yüzeylerde farklı polarizasyon ve geliş açıları rezonans frekansının ve bant genişliğinin yanı sıra iletim ve yansıma karakteristiklerinin değişmesine sebep olmaktadır. Frekans seçici yüzeyler teoride sonsuz periyodik diziler olmasına karşın gerçekte sonsuz uzunlukta bir dizinin gerçekleştirilmesi mümkün olmamaktadır. Sonlu sayıda eleman içeren bu yapılar özellikle dalganın geliş açısının değişiminden oldukça fazla etkilenmektedirler. Bu sebeple frekans seçici yüzey tasarımında açısal kararlılık ve polarizasyondan bağımsız olması önem arz etmektedir [5].

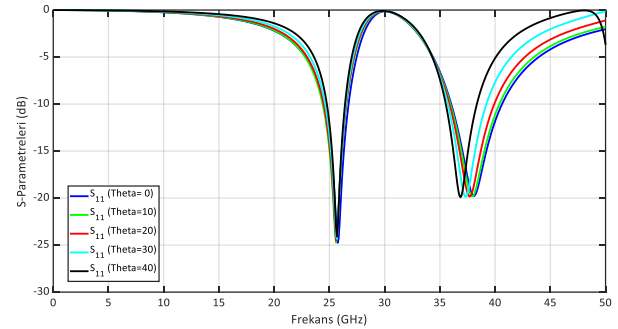
Tasarlanan birim hücrenin polarizasyon kararlılığını incelemek amacıyla TE (Transverse Electric) ve TM (Transverse Magnetic) modları için analiz yapılmış ve sonuçları karşılaştırılmıştır. TE modu iletim yönüne elektriksel alanın dik olduğu durum iken, TM modu ise iletim yönüne manyetik alanın dik olduğu durumdur. CST Microwave Studio programında birim hücre z-eksenine dik olarak yerleştirilmiştir. Theta ve Phi açı değerleri değiştirilerek sinyalin geliş açısına göre benzetimi yapılabilmektedir. Bu sayede birim hücre, farklı açılardan gelen sinyaller ile analiz edilebilmektedir. Birim hücrenin polarizasyon kararlılığı incelenirken TE modu için Phi açısı sıfır derece, TM modunda ise Phi açısı 90 derece değerindedir.

Polarizasyon kararlılığına sahip bir birim hücrenin TE ve TM modu için aynı tepkiyi vermesi beklenir. 5G milimetre dalga uygulamaları için kullanılmak üzere tasarlanan frekans seçici yüzeylerin hem TE hem de TM dalgalarına cevabı irdelenmektedir. Birim hücrenin TE ve TM modundaki frekans cevabının minimum etkilenmesi için orijine göre simetrik yapıların tercih edilmesi önerilmektedir. Bu doğrultuda çalışma kapsamında tasarlanan özgün çift bantlı frekans seçici yüzey birim hücrenin TE ve TM modunda elde edilen S-parametreleri Şekil 3'te gösterilmektedir. Şekil 3 incelendiğinde birim hücrenin TE ve TM modunda benzer S_{11} ve S_{21} değişimine sahip olduğu görülmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzeyin orijine göre simetrik yapısı sebebiyle polarizasyon değişiminden minimum düzeyde etkilenmiştir. Bu durum da tasarlanan birim hücre yapısının polarizasyon kararlılığına sahip olduğunu göstermektedir.

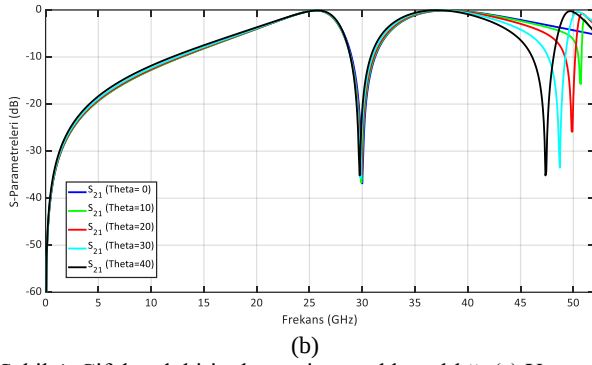


Şekil 3: TE ve TM modunda yansıma (S_{11}) ve iletim (S_{21}) katsayıları.

Frekans seçici yüzeyler üzerine elektromagnetik dalga farklı geliş açılarıyla gelebilmektedir. Bu sebeple birim hücrenin farklı geliş açılarındaki benzer karakteristik göstermesi beklenmektedir. Tasarlanan frekans seçici yüzey birim hücrenin farklı geliş açıları için benzetimi CST Microwave Studio programı ile yapılarak yansıma ve iletim özellikleri elde edilmiştir. Şekil 4 (a) ve (b)'de sırasıyla S_{11} ve S_{21} parametrelerinin farklı geliş açılarındaki frekansa bağlı değişimi yer almaktadır. Tasarlanan birim hücrenin S_{11} ve S_{21} parametreleri incelendiğinde $\theta=0^\circ$, 10° , 20° , 30° , 40° değerlerinde birinci bantta açısal kararlılık olduğu görülmektedir. Artan gelme açısıyla rezonans frekansı korunmakta fakat bant daralmaktadır. Birinci bantta hedeflenen 500 MHz'lik bant genişliği $\theta=40^\circ$ geliş açısına kadar korunmuştur. İkinci bantta ise $\theta=30^\circ$ 'ye kadar rezonans frekansında düşük kayma gözlenirken daha yüksek geliş açılarındaki kayma düşük frekanslara doğru artmaktadır. Yüksek geliş açılarındaki bantın daraldığı da gözlenmektedir. Bu sonuçlar, önerilen birim hücrenin birinci rezonans bölgesi için açısal kararlılığının iyi olduğunu, ikinci rezonans bölgesinde ise $\theta=40^\circ$ üzerindeki geliş açılarındaki bant dışına çıktığını göstermektedir. Ayrıca büyük geliş açısı değerleri için üçüncü bir rezonans bölgesi oluşmaktadır.



(a)



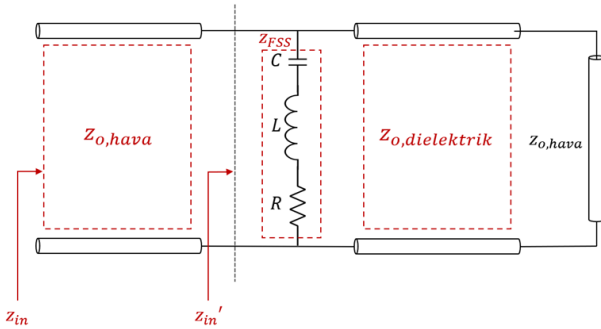
Şekil 4: Çift bantlı birim hücrenin açısal kararlılığı (a) Yansımaya katsayısı; (b) İletim katsayısı

2.3. İletim Hattı Modeli

Eşdeğer devre yöntemi, yapısal tasarımın belirlenmesinde referans oluşturmaya amacıyla kullanılmaktadır. Eşdeğer devre yönteminin kullanılması ile FSY'nin frekans cevabı üzerindeki etkileri gözlemlenmekte ve tasarımlar bu gözlemler neticesinde son halini almaktadır.

Tasarımı yapılan frekans seçici yüzey deseni, RLC devre ağı ile modellenebilir. Önerilen frekans seçici yüzeyin çift bant filtre özelliği, yarıklı modelin endüktif ve kapasitif yanıtlarına dayanmaktadır. R, frekans seçici yüzey dizisinin direncini temsil ederken, L ve C sırasıyla eşdeğer endüktans ve kapasitans anlamına gelir.

Tasarlanan frekans seçici yüzey yapısının iletim hattı eşdeğer modeli Şekil 5'te gösterilmektedir. Birim hücrenin iletim hattı modelinde RLC devre ağından oluşan FSS empedansı Z_{FSS} , giriş empedansı Z_{in} , havanın karakteristik empedansı $Z_{o,hava}$, dielektrik alt tabakanın açık devre yük empedansı $Z_{o,dielektrik}$ ile sembolleştirilmiştir. Bunlara ek olarak, malzeme ve iletim hattı kayıplarına modelde yer verilmiştir.



Şekil 5: Birim hücrenin iletim hattı eşdeğer modeli

Frekans seçici yüzey birim hücresinin giriş empedansı olan Z_{in}' Eşitlik (1) ile elde edilmektedir:

$$Z_{in}' = \frac{Z_{FSS} \times Z_{o,dielektrik}}{Z_{FSS} + Z_{o,dielektrik}} \quad (1)$$

Burada $Z_{o,dielektrik}$ dielektrik alt tabakanın açık devre yük empedansıdır. $Z_{o,dielektrik}$ empedansı Eşitlik (2) ile verilir:

$$Z_{o,dielektrik} = -j\eta_1 \cot(k_d h) \quad (2)$$

Bu eşitlikte η_1 dielektrik malzemenin karakteristik empedansı, k_d dalga sayısı ve h dielektrik malzemenin kalınlığıdır. Karşılıklı gelen yansıma katsayısı Eşitlik (3) ile ifade edilir.

$$\Gamma = \frac{Z_{in} \times Z_{o,hava}}{Z_{in} + Z_{o,hava}} \quad (3)$$

Bu doğrultuda $Z_{in}' \rightarrow Z_{o,hava}$ için metasurface ve açık alan arasında empedans eşleşmesi sağlanır ve bu eşitliğe göre sıfır yansıma katsayısı (Γ) elde edilir.

3. Sonuçlar

Bu çalışmada 5G milimetre dalga iletişiminin bant gereksinimlerini karşılamak amacıyla çift bantlı frekans seçici yüzey tasarımı sunulmuştur. Tasarımı yapılan frekans seçici yüzeyin, 5G uygulama bantları içerisinde yer alan 24.75 – 25.25GHz ve 37.60 – 40.00 GHz frekans aralıklarında çalışması amaçlanmaktadır. Bahse konu iki bant aralığında frekans seçici yüzeyin bant geçiren filtre özelliği taşıması, açısal ve polarizasyon kararlılığına sahip olması hedeflenmiştir. Bu hedefler doğrultusunda özgün birim hücre modeli oluşturulmuş ve benzetim sonuçları ile performansı, açısal ve polarizasyon kararlılığı sunulmuştur.

(Bu çalışma Yıldız Teknik Üniversitesi Bilimsel Araştırma Proje Koordinatörlüğünün FBA-2021-4747 numaralı projesi ile desteklenmiştir.)

4. Kaynaklar

- [1] Bilgi Teknolojileri ve İletişim Kurumu (BTK), “5G ve Dikey Sektörler Raporu”, 2018.
- [2] Huawei, “5G Spectrum Public Policy Position”, 2020
- [3] Munk B. A., New York Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, 2000.
- [4] Recommendation ITU-R M.2083, “IMT Vision – Framework and overall objectives of the future development of IMT for 2020 and beyond”, 2015, pp.1-19.
- [5] Gürdal S., “5G Milimetre Dalga Uygulamaları için Üç Bantlı Frekans Seçici Yüzey Tasarımı”, 2021, pp. 42-44.