



Fotonik Fener Tabanlı Eş-Fazlı Alıcı Performans Analizi

Program Kodu: 3001

Proje No: 114E402

Proje Yürütücüsü:
Doç. Dr. İbrahim T. Özdür

Mayıs 2016

ANKARA



Önsöz

Bu projede fotonik fener tabanlı eş-fazlı alıcıların performans analizi araştırılmıştır. Bunun yanında fotonik fener kullanılmayan sistemler ile boyut güç tüketimi gibi parametreleri incelenmiştir. Bu proje TUBİTAK tarafından desteklenmiştir.



İÇİNDEKİLER

Şekil Listesi	iv
Tablo Listesi	v
Özet	vi
Abstract	vii
1. GİRİŞ	1
2. LİTERATÜR ÖZETİ	3
3. GEREÇ, YÖNTEM VE BULGULAR	7
3.1 Sinyal gürültü oranı	7
3.2 Sistem parametreleri	9
3.3 BER hesaplanması	12
3.4 Fotonik Fenerlerin Sistem Parametrelerine Olan Katkısının İncelenmesi	16
4. SONUÇ	19
Kaynaklar	20

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil		Sayfa
1	(a) Fotonik fenerin temsili resmi. Soldaki kısım çok modlu ışığın geldiği, ortadaki kısım çok modludan tek modlu fibere geçiş bölgesini sağdaki kısım ise fotonik fenerin çıkışındaki tek modlu fiberleri göstermektedir. (b) Fotonik fenerlerin ışığı teleskoptan alıp CCD ekrana gönderirken gereken düzenek.	3
2	Toplanan optik gücün fiberlerdeki rastgele dağılımı (Ozdur vd., 2013).	4
3	3 modlu fotonik fener kullanarak birkaç modlu fiberdeki yüksek modların uyarılması (Şekil Sergio G. Leon-Saval et al., 2014'den alınmıştır.)	5
4	6 mod destekleyen birkaç modlu fiberin gösterimi (Şekil Fontaine & Ryf, 2013'den alınmıştır.)	5
5	Fotonik fener kullanarak birkaç modlu fiberde optik yükseltme (Şekil Aleshire et al., 2016'dan alınmıştır.)	6
6	Tek modlu fiber temelli eş fazlı algılama sistemi	7
7	Fotonik fener temelli eş fazlı uygulama sistemi	8
8	Voltaj sinyal gürültü oran iyileştirme histogramı	9
9	Eş-fazlı LIDAR sistemlerinin şematik gösterimi	9
10	Tepe gücü sönmüleme oranı grafiği	10
11	Tek modlu fiberlerde hedeften yansıyan ışığın fiber optik kablonun olduğu yerdeki görüntüsünün fiber optik kablodan büyük olmasının gösterimi (Lindelöw, 2007'den alınmıştır).	11
12	Eş fazlı algılama için toplam optik kayıp, mesafe ilişik grafiği	12
13	Tek modlu eş fazlı algılayıcı modeli. AGF: Alçak geçiren filtre	12
14	Fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı modeli. AGF: Alçak geçiren filtre.	13
15	125, 250 ve 500 mW gönderilen optik güç için tek modlu ve fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı sisteminin karşılaştırması (Soğurulma oranı 20 dB)	14
16	1 W gönderilen optik güç için tek modlu ve fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı sisteminin karşılaştırması (Soğurulma oranı 20 dB)	15
17	Optik güç arttıkça olasılık yoğunluk fonksiyonundaki değişim.	16

TABLO LİSTESİ

Tablo		Sayfa
1	Hesaplamalarda alınan değerler	13



ÖZET

Boş uzay eş fazlı algılama sistemlerinin performanslarını arttırmak için fotonik fenerli sistemler önerilmiştir (US 9322992). Bu projede fotonik fenerli eş fazlı alıcıların sistem performansına nasıl katkı yaptıkları incelenmiş ve sonrasında sistem seviyesinde nasıl geliştirmelere sebep olacağı araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda fotonik fener tabanlı sistemlerin sinyal gürültü oranına önemli şekilde katkı sağladıkları bulunmuştur. Bu sinyal gürültü oranındaki gelişimi asıl önemli parametre olan hata oranına çevirmek için yoğun çalışmalarda bulunulmuş ve sonuçlar proje raporunda sunulmuştur. Hata oranındaki değişim farklı optik güçlerde farklı değerlerde olmuştur. Örneğin 250 mW gönderilen optik güç için hata oranı %40 dan, bu tarz sistemler için kabul edilebilir olan %10 seviyesine indirilmiştir. Ayrıca fotonik fenerlerin ağırlık güç tüketimi gibi parametrelere katkısı da araştırılmış ve en büyük katkılarının aynı performans için gereken 1.5 kat daha kısa çapı olan optik lens olduğu değerlendirilmiştir.



ABSTRACT

Photonic lantern based systems are introduced in order to improve the performance characteristics of free space coherent receivers. In this project, the performance effect of photonic lanterns on free space coherent receivers is analyzed. It is found that photonic lanterns improve the signal to noise ratio significantly. From the system perspective the error is the figure of merit for such systems; hence the error rate performance of photonic lantern based systems is also analyzed and presented in this report. Different transmitter optical powers result in different improvement ratios, for example if the transmitted optical power is 250 mW the error rate is improved from 40% to 10% using photonic lanterns. Photonic lanterns may also improve the size weight and power of a system. We have found that using photonic lanterns a system with 1.5 times smaller optical lens has the same performance.



1. GİRİŞ

Boş uzay (free space) optik sistemleri, lazer ile mesafe ölçme, üç boyutlu görüntüleme, hava durumu tahminleri ve optik kablosuz iletişim gibi uygulamalarından dolayı dikkat çekmektedirler. Bu alanlardaki çalışmalar, daha yüksek performanslı, daha küçük, daha hafif ve daha az enerji tüketen sistemler üzerine yoğunlaşmıştır. Boş uzay optik sistemlerinin performanslarındaki yetersizlikten dolayı şu anda uygulama aşamasına geçememiş olan, lazer ile uzaktan yüz tanıma ve kara mayını bulma gibi yeni alanlar ile yüksek hız gereksinimindeki sürekli artan talep, boş uzay optik sistemlerindeki araştırmalar için en büyük motivasyonu sağlamaktadır. Ayrıca sistemin boyut, ağırlık ve enerji metriklerindeki yetersizliklerden dolayı mikro ve nano insansız hava araçlarında ve uydu sistemleri gibi platformlarda uygulamaları sınırlıdır. Daha küçük, daha hafif ve daha az enerji ihtiyacı olan sistemler mikro ve nano insansız hava araçlarına entegre edilerek istihbarat, gözetleme, bina içi ve mağara gibi dar yerlerde üç boyutlu görüntüleme; ayrıca uydu sistemlerine entegre edilerek üç boyutlu haritalama ve yüksek hızlı optik iletişim gibi alanlarda kullanılabilir.

Boş uzay optik sistemlerini oluşturan elemanlar ana olarak verici ve alıcıdan oluşurlar. Verici tasarımları genel olarak basit ve benzer olmasına rağmen, sistem performansını belirleyen en önemli ve karmaşık eleman alıcıdır. Alıcı teknikleri içerisinde eş-fazlı optik algılama (coherent optical detection) yüksek hassasiyet ve hız gerektiren uygulamalarda öne çıkmaktadır. Eş fazlı algılama teknikleri bu yüksek performanslarını sinyalden çok daha güçlü olan lokal osilatör ile birleştirilmeleri sayesinde elde ederler. Sinyal ile lokal osilatör algılayıcı sistemde eş-fazlı olarak birleştirilirken en yüksek verimi elde etmek için mekânsal boyutta optik güç ve faz dağılımlarının aynı olması, yani aynı optik moda sahip olmaları, gerekir. Tek modlu fiber temelli eş-fazlı sistemlerin algılayıcılarında sinyal ile lokal osilatör neredeyse tamamen üst üste geldiği için mükemmel yakın eş-fazlı algılama performansı elde edilir. Bu yüzden eş-fazlı boş uzay sistemlerinde, boş uzaydan gelen sinyal tek modlu fibere birleştirilir. Boş uzay sistemlerinde vericiden gönderilen sinyal tek modlu olsa bile atmosferik etkenler ve optik beneklilikten (speckle) dolayı algılayıcıya gelen sinyal çok modludur (multi mode). Çok modlu bir sinyal, tek modlu bir fiber ile birleştirildiğinde ise kaçınılmaz olarak yüksek kayıp ile karşılaşılır, bu kayıp ise sistem performansını sınırlar.

Boş uzaydan gelen çok modlu sinyalin düşük kayıp ile tek modlu fibere gönderilememesi sorununa çözüm astronomi alanından gelmiştir. Dış uzaydan gelip teleskopun içerisindeki fiber ile birleştirilen optik sinyal gücünü çok modlu fiber kullanarak arttırmak, aynı zamanda da

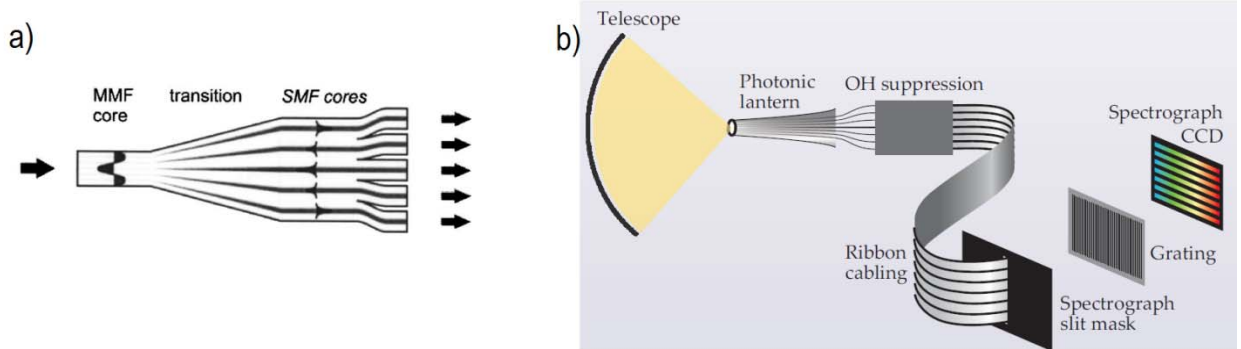


tek modlu fiberin filtreleme gibi optik sinyal işleme üstünlüklerini elde etmek için fotonik fener (photonic lantern) adı verilen cihazlar tasarlanmıştır. Fotonik fenerlerin bir ucu çok modlu fiberden diğer uçları ise birden fazla tek modlu fiberden oluşur. Fotonik fenerlerin difuze bir hedeften yansıyan ışınlar için toplama verimlilikleri (collection efficiency), bu proje teklifinin yazarı tarafından daha önce incelenmiş ve yakın alanda (near field) 8 dB daha yüksek tek-modlu optik güç elde edilmiştir.

Fotonik fenerlere boş uzaydan gelen optik gücün 19 adet tek modlu fiberdeki dağılımı, gelen ışığın mod profilinin rastgele olmasından dolayı eşit değil rastgeledir. Bu rastgelelikten dolayı 8 dB'lik optik güç artırımını sinyal gürültü oranına direkt olarak yansımaz. Bu çalışmada fotonik fenerden gelen ışığın ne kadarlık sinyal gürültü oranı iyileştirmesi meydana getirdiği ve bu geliştirmenin sistem parametrelerindeki hata payına nasıl etki ettiği sunulacaktır. Bunun yanında fotonik fenerler kullanılan sistemlerin diğer sistemlere göre olacak olan güç tüketimi, boyut gibi parametrelerinde nasıl değişiklik sağlayacağı da incelenmiş ve bu raporda sunulmuştur.

2. LİTERATÜR ÖZETİ

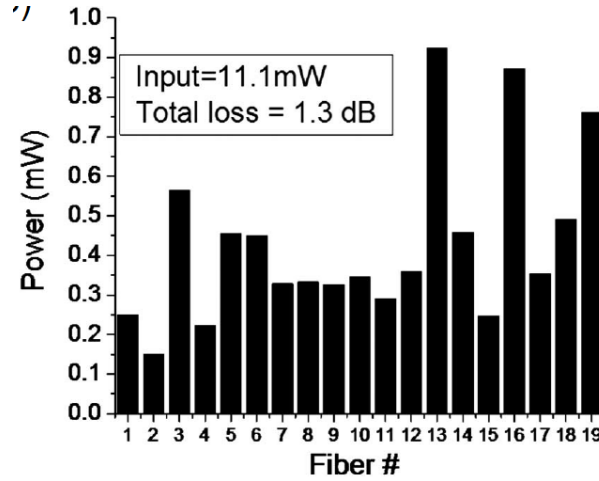
Fotonik fenerler ile ilgili yapılan ilk çalışmalar astrofizik alanında gözlemlenen bir soruna çözüm arama esnasında olmuştur. Atmosfer dışından gelen optik sinyallerin spektrumları uzaydaki gaz bulutlarının ve yıldızlar ile gezegenleri oluşturan bileşenlerin içeriği hakkında çok değerli bilgiler vermektedir. Uzaydan gelen optik sinyallerin spektrumu atmosferin içeriğindeki OH moleküllerinin ışımından kaynaklı OH çizgileri tarafından baskılanmaktadır. Bu OH çizgilerinin filtrelenmesi için en iyi yöntem tek-modlu fiber Bragg ızgarası (fiber Bragg grating) temelli çok dar bant genişliğine sahip optik filtreler kullanılmasıdır (J. Bland-Hawthorn et al., 2011; Joss Bland-Hawthorn & Kern, 2012). Fakat, atmosfer dışından gelen optik sinyali toplarken en yüksek verimi sağlamak için çok modlu fiberler kullanılmamasından dolayı tek modlu fiberde yapılması gereken filtreleme işlemi çok etkili bir şekilde yapılamamaktadır. Bu sorunun çözümü için fotonik fener (photonic lantern) adı verilen, Şekil 1a'da da gösterilen, bir tarafında çok modlu tek bir fiber, diğer ucunda ise tek modlu birden fazla fiber bulunan sistemler önerilmiştir (J. Bland-Hawthorn et al., 2011; S G Leon-Saval, Birks, Bland-Hawthorn, & Englund, 2005). Fotonik fenerlerinin teleskoplarda kullanımı hem atmosferden gelen ışığın maksimum bir şekilde toplanabilmesini sağlamış hem de tek modlu fiberler sayesinde uzaydan gelen ışığın içeriğindeki OH emisyon çizgileri etkili bir şekilde filtrelenmiştir. Fotonik fenerlerin teleskoplarda kullanımını özetleyen bir figür Şekil 1b de verilmiştir.



Şekil 1.(a) Fotonik fenerin temsili resmi. Soldaki kısım çok modlu ışığın geldiği, ortadaki kısım çok modludan tek modlu fibere geçiş bölgesini sağdaki kısım ise fotonik fenerin çıkışındaki tek modlu fiberleri göstermektedir. (b) Fotonik fenerlerin ışığı teleskoptan alıp CCD ekrana gönderirken gereken düzenek.

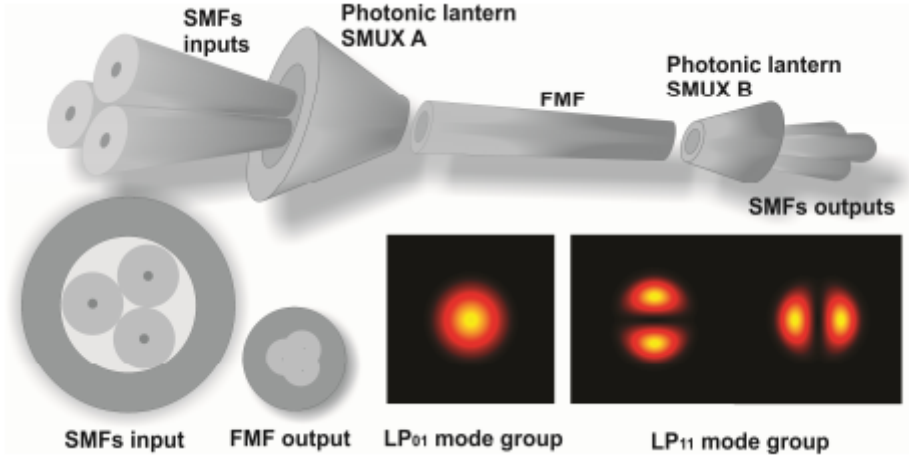
Fotonik fenerler üzerine yapılan çalışmaların çoğu fotonik fiberlerin çok modlu kısmından tek modlu kısmına geçişteki kayıp üzerine olmuştur (S G Leon-Saval et al., 2005; Noordegraaf et al., 2010, 2012). Fotonik fenerlerin boş uzaydan ve Lambertian yansıma özelliğine sahip difuze bir hedeften yansıyan ışıklar için toplama verimlilikleri (collection efficiency), bu proje teklifinin yazarı tarafından incelenmiş ve yakın alanda (near field) 8 dB daha yüksek tek-modlu optik güç elde edilmiştir. Bu 8 dB lik kazanım, bir ucu 50 um çapında çok modlu diğer ucunda

ise 19 adet tek modlu fiber olan bir fotonik fenerden ölçülmüştür (Ozdur, Toliver, Agarwal, & Woodward, 2013) . Toplama verimliliğiyle ilgili sonuçlar Şekil 2'de gösterilmiştir. Atmosferik etkenler ve beneklilikteki rastgelelikten dolayı difuze hedeften yansıyan optik sinyalin mod profili değişken ve rastgeledir. Fotonik fenerin çok modlu tarafına birleştirilen ışık çok modlu ve mod profilinin rastgele olmasından dolayı 19 adet tek modlu fiberlerdeki ışık dağılımı eşit değil rastgeledir, Şekil 2. Bu rastgelelikten dolayı 8 dB'lik optik güç artırımı sinyal gürültü oranına direkt olarak yansımaz.



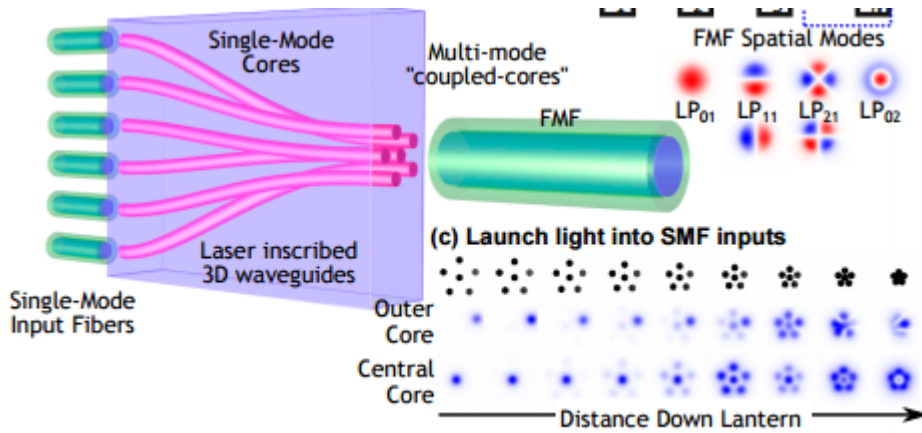
Şekil 2. Toplanan optik gücün fiberlerdeki rastgele dağılımı (Ozdur vd., 2013).

Fotonik fenerler mod birleştirme ayırma gibi özellikleriyle tanındıkça, boş uzaydan gelen ışığı toplamak yerine optik iletişimdeki uygulamaları araştırılmaya başlanmıştır. Optik iletişimde, zamanda bölme - çoklama (time division multiplexing), polarizasyon çoklama (polarization multiplexing) ve dalga boyu bölme çoklama (wavelength division multiplexing) gibi çoklama teknikleri kullanarak çok yüksek veri iletim hızlarına ulaşılmaktadır. Son yıllarda veri iletim hızı gelişmelerinde yavaşlama olmuş ve bu yavaşlama uzaysal bölme çoklama (spatial division multiplexing) ile çözülmeye çalışılmaktadır. Bu uzaysal bölme çoklama tekniklerinde ilk olarak mod sayısı 3 veya 5 olan birkaç mod fiberler kullanılmaktadır. İlk denemelerde birkaç mod fiberin yüksek modlarına sinyal göndermek için optik bileşenler kullanılmaktaydı (Ryf et al., 2013). Fakat daha sonraları fotonik fenerlerin bu amaç için kullanılabileceği fark edildi. Bu uygulamalar için 19 mod çok fazla olduğu için ilk başta birkaç mod fiberler kullanarak sadece 3 fiberli fotonik fenerler kullanılmıştır. 3 modlu fotonik fener kullanarak birkaç modlu fiberdeki 3 modun da uyarılması Şekil 3'de gösterilmektedir. Bu konuda ayrıntılı bir çalışma (Sergio G. Leon-Saval et al., 2014)'da verilmiştir.



Şekil 3. 3 modlu fotonik fener kullanarak birkaç modlu fiberdeki yüksek modların uyarılması (Şekil Sergio G. Leon-Saval et al., 2014'den alınmıştır.)

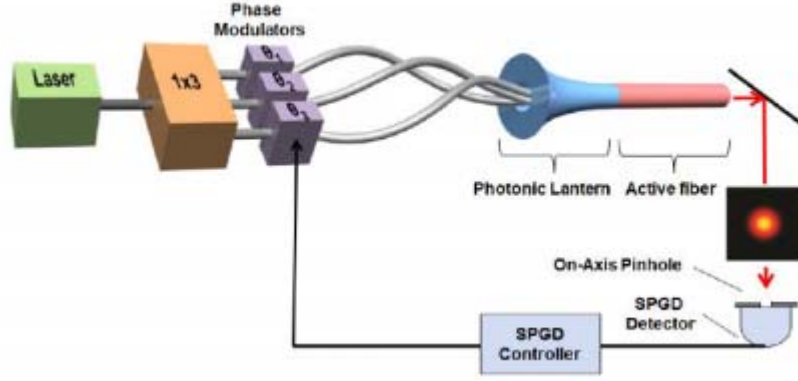
Birkaç modlu fiberlerin mod sayısı az olmakla beraber mod sayısı farklı rakamlarda olabilir. Fotonik fenerler ise her mod sayısına sahip birkaç modlu fiberle çalışabilmektedirler (Fontaine & Ryf, 2013). 6 mod destekleyen bir fotonik fenerle yapılan çalışmanın bir gösterimi Şekil 4'de verilmiştir.



Şekil 4. 6 mod destekleyen birkaç modlu fiberin gösterimi (Şekil Fontaine & Ryf, 2013'den alınmıştır.)

Birkaç modlu fiber optik linklerin yüksek modların uyarılması fotonik fenerler ile kolaylaştıkça ortaya diğer bileşenlerin eksikliği çıkmıştır. Şu anda var olan optik yükselteçlerin neredeyse tamamı tek modlu fiberler ile çalışmaktadır. Birkaç modlu fiberler kullanarak yapılan optik yükselteçlerde ilk başlarda boş uzay bileşenler kullanılmaktaydı fakat bu tarz bileşenlerin çip haline getirilememesi önündeki en büyük engellerden biridir. Bu probleme çözüm yine fotonik fenerlerden gelmiştir. Birkaç modlu fiber optik yükselteçlerin yapımında her bir optik moda farklı fazlarda optik sinyal

gönderilmesi gerekmektedir. Bunun içinde en basit yöntem fotonik fener kullanmaktır (Aleshire et al., 2016) .



Şekil 5. Fotonik fener kullanarak birkaç modlu fiberde optik yükseltme (Şekil Aleshire et al., 2016'dan alınmıştır.)

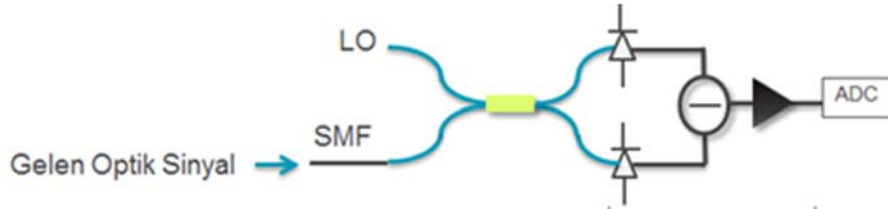
3. GEREÇ, YÖNTEM VE BULGULAR

Fotonik fenerlerin eş fazlı algılama için uygulaması alanında buluş yapanlar arasında bu projenin yöneticisinin de bulunduğu bir patent alınmıştır (US 9322992) (Woodward Ted K. , Toliver Paul, Ozdur Ibrahim, 2016). Bu çalışma, patenti alınan fikrin, sistem seviyesinde nasıl bir katkı sağlayacağı ile ilgilidir.

Herhangi bir algılama sisteminin performans analizi yapılırken ilk bakılan en temel öge sinyal gürültü oranıdır. Sinyal gürültü oranı sistem performansı açısından önemli bilgiler verse de asıl sistem parametresi sistem hata oranıdır. Sinyal gürültü oranı sistem hata oranını geliştirdiği için önemlidir. Bu çalışmada ilk önce sinyal gürültü oranının analizi yapılmış daha sonra ise sistem hata oranı ile ilgili çalışmalara yer verilmiştir.

3.1 Sinyal gürültü oranı

Eş fazlı algılama sistemleri sağanak gürültüsü ile sınırlı performanslarını sinyalden çok daha güçlü olan lokal osilatör (LO) sayesinde elde ederler. Sinyal ile LO, algılayıcı sistemde eş-fazlı olarak birleştirilirken en yüksek verimi elde etmek için mekânsal boyutta optik güç dağılımlarının aynı olması – yani aynı optik moda sahip olmaları - gerekir. Tek modlu fiber temelli eş-fazlı sistemlerin algılayıcılarında sinyal ile LO, neredeyse tamamen üst üste geldiği için mükemmel yakın eş-fazlı algılama performansı elde edilir. Tipik bir tek modlu fiber temelli eş fazlı algılayıcı sistem Şekil 6’te gösterilmiştir.



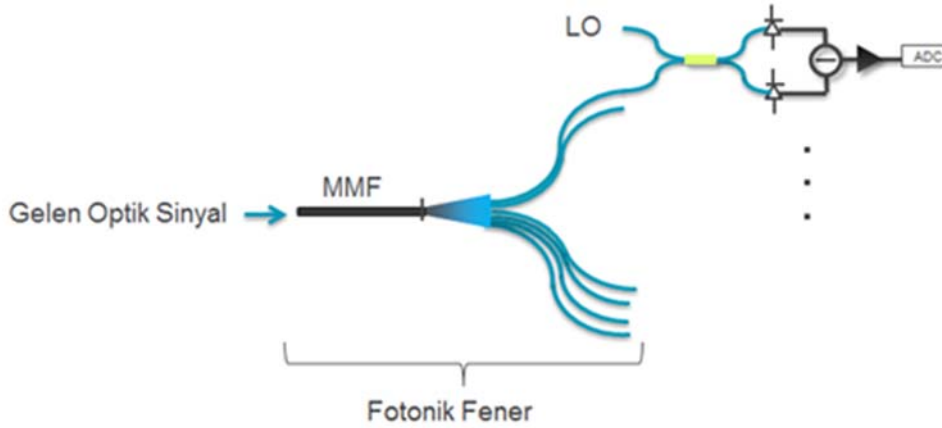
Şekil 6. Tek modlu fiber temelli eş fazlı algılama sistemi

Eş fazlı algılayıcı sistemlerde elde edilen elektriksel sinyalin büyüklüğü tek bir foto algılayıcı için,

$$I_{signal} \propto \left(\sqrt{P_{LO}} \cos(\omega_{LO}t) + \sqrt{P_{sig}} \cdot \cos(\omega_{sig}t + \phi) \right)^2$$

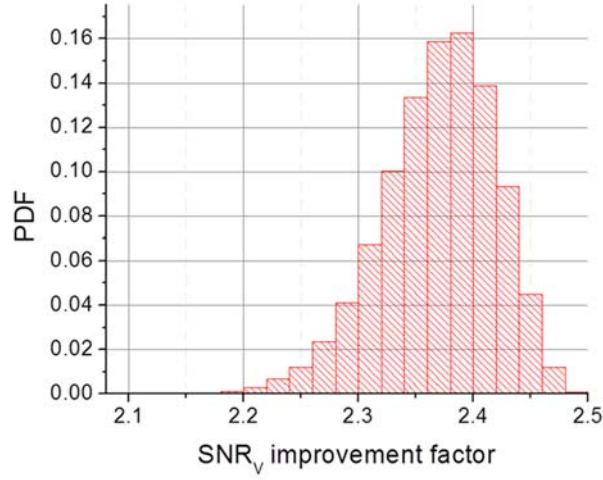
olarak yazılabilir. Bu denklemde P_{LO} ve P_{sig} , LO’dan ve boş uzaydan gelen optik optik sinyalin yoğunluğu, ω_{LO} ve ω_{sig} , LO ve boş uzaydan gelen optik sinyalin frekansı ve ϕ , LO ve sinyal arasındaki faz farkıdır. Bu denklem çözüldüğünde üç farklı terimle karşılaşılır:

Sabit Terim + Yüksek frekanslı Terim + $\sqrt{P_{LO}} \sqrt{P_{sig}} \cos((\omega_{sig} - \omega_{LO})t + \phi)$. Bu terimlerden birincisi elektrik domende doğru akım olduğu için herhangi bir bilgi içermez, ikinci terimde foto algılayıcıların bant genişliğinden çok daha yüksek frekansa sahip olduğu için yine ilk terim gibi davranır. Asıl eş fazlı birleştirme bilgisi üçüncü terimde yani $\sqrt{P_{LO}} \sqrt{P_{sig}} \cos((\omega_{sig} - \omega_{LO})t + \phi)$ de saklıdır. Buradan da görüleceği gibi elektrik sinyal büyüklüğü boş uzaydan gelen optik sinyalin kareköküyle doğru orantılıdır. Elde edilen sinyalin büyüklüğü boş uzaydan gelen sinyalin doğrudan değil, karekökü ile doğru orantılı olduğu için, sistem performansındaki gelişme boş uzaydan toplanan ışığın fotonik fenerdeki 19 adet tek modlu fibere dağılımı ile de alakalı olacaktır. Ozdur vd., 2013'de gösterildiği gibi fotonik fenerler kullanarak boş uzaydan gelen optik güçte 8 dB yada 6.3 kat artma gözlenmiştir. Fotonik fenerin tek modlu fiber kısımlarındaki toplam güç sabittir fakat bu gücün tek modlu fiberlerdeki dağılımı tamamen rastgeledir ve zamanla değişebilmektedir. Bu proje önerisinde ayrıntılı olarak incelenecek olan fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı sistem Şekil 7 de gösterilmiştir.



Şekil 7. Fotonik fener temelli eş fazlı uygulama sistemi

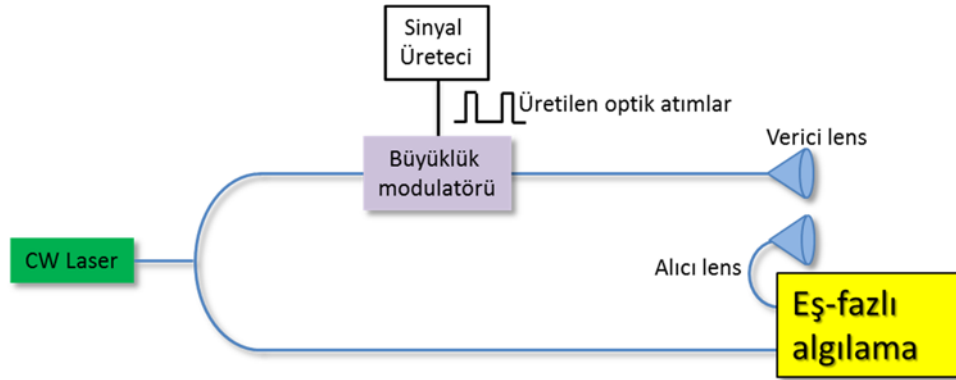
Projede yapılan ilk çalışmada fotonik fenerin 19 adet tek modlu fiber kısımlarında toplam gücü sabit tutacak şekilde bir birlerine göre olan güç dağılımını rastgele değiştirerek elde edilen sinyal gürültü oranının dağılımına bakılmıştır. Bu istatistiksel hesaplamaya göre % 99.996 ihtimal ile fotonik fenerli eş fazlı alıcının voltaj sinyal gürültü değeri 2.1 kat daha iyi bir değere sahiptir. Sinyal gürültü değerinin histogramı Şekil 8 de gösterilmiştir. Bu histograma göre voltaj sinyal gürültü oranı iyileştirilmesi değeri 2.2 ile 2.5 arasında değişmektedir. Bu değerler de 4.84 ve 6.25 güç sinyal gürültü oranı iyileştirilmesine denktir (Ozdur v.d. 2015).



Şekil 8. Voltaj sinyal gürültü oran iyileştirme histogramı.

3.2 Sistem parametreleri

Eş fazlı algılayıcı sistemlerinin hata oranlarının incelenmesi için eş-fazlı bir LIDAR sistemi ele alınmıştır. Eş-fazlı LIDAR sistemlerinin şematik bir gösterimi Şekil 9'da verilmiştir.



Şekil 9. Eş-fazlı LIDAR sistemlerinin şematik gösterimi

Bu sistemlerde eş fazlılık özelliği yüksek olan bir lazer kaynağından çıkan optik güç ikiye ayrılır. Bu iki sinyalden bir tanesi modüle edilip optik atımlar haline geldikten sonra hedefe gönderilir. Diğeri ise lokal osilatör olarak eş-fazlı algılama yapılacak olan sisteme gider.

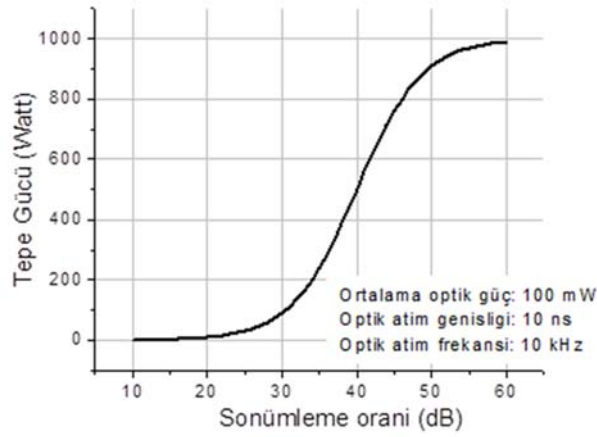
3.2.1 Tepe gücü hesaplanması

Hedefe gönderilen optik gücün ortalama değeri bir optik güç ölçer kullanılarak rahatlıkla ölçülebilir. Fakat sistem performansını belirleyecek olan optik güç miktarı ortalama güç değil

optik atımların tepe güç miktarıdır. Ortalama optik güçten tepe optik gücü hesaplamak için aşağıdaki eşitlikten faydalanılmıştır (Toliver, Ozdur, Agarwal, & Woodward, 2013).

$$P_{tepe} = \frac{P_{ort}}{\Delta t_{ag} f_{tekrar} - SO(1 - \Delta t_{ag} f_{tekrar})} \quad 1$$

Bu eşitlikte P_{tepe} , optik atımın tepe noktasındaki güç miktarı; P_{ort} , ortalama optik güç; Δt_{ag} , optik atım genişliği; f_{tekrar} , optik atım tekrar frekansı ve SO büyüklük modülatöründeki optik güç sönümlenme oranıdır. Optik atım sönümlenme oranı belirli bir ortalama güçteki tepe gücü belirleyen en önemli parametrelerden biridir. Sönümlenme oranı yeterli seviyede olmadığı durumda iki optik atım arasındaki sönümlenmiş optik gücün toplamı optik atımın içindeki optik güçten daha yüksek bile olabilmektedir. Bu sebeple optik atım sönümlenme oranının yüksek olması önemli bir kriterdir. Tipik bir elektro optik modülatörün sönümlenme oranı yaklaşık 20 dB civarındadır fakat özel tasarım elektro optik modülatörler ile bu değer arttırılabilmektedir. Diğer bir modülatör çeşidi olan akusto optik modülatörler ise yaklaşık 50 dB değerinde sönümlenme oranına sahip olabilmektedir. 100 mW ortalama güç, 10 ns optik atım genişliği ve 10 kHz optik atım frekansı için optik atım tepe gücü sönümlenme oranı Şekil 10'de gösterilmiştir.



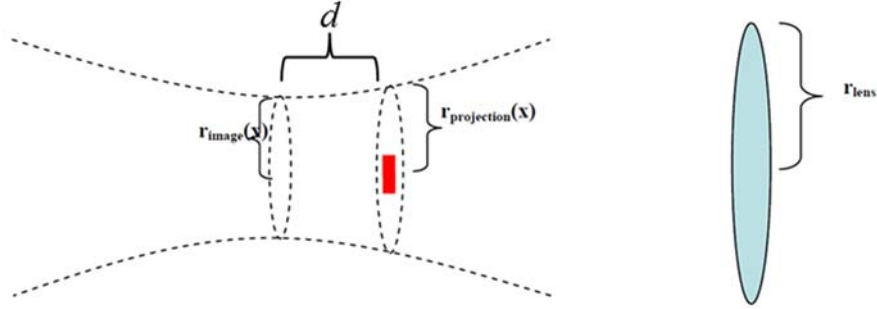
Şekil 10. Tepe gücü sönümlenme oranı grafiği

3.2.2 Gidiş geliş optik kayıp hesaplanması

LIDAR sistem gönderilen sinyalin çok küçük bir kısmı geri dönmektedir. Geniş alan (yada çok modlu) bir detektörünün kullanıldığı sistemlerde gidiş-geliş toplam optik kayıp oranı,

$$\eta_{toplama} = \frac{\eta_{hedef} D^2 \pi}{4L\Omega} \quad 2$$

eşitliliği ile hesaplanır. Bu eşitlikte η_{hedef} , hedefin yansıtma katsayısı; D , alıcının çapı; L , hedefe olan uzaklık ve Ω , yansıma açısıdır (difuze objeler için – Lambertian - $\Omega = \pi$). Bu kayıp hesaplama formülü geniş alan detektörleri için oldukça iyi çalışsa da tek modlu fiberler tabanlı algılayıcılar için bir düzeltme faktörü ile çarpılması gerekmektedir. Bunun sebebi hedeften yansıyan ışığın fiber optik kablunun olduğu bölgedeki görüntüsünün fiber optik kablunun genişliğinden büyük olmasıdır. Bu olay Şekil 11’de gösterilmiştir.



Şekil 11: Tek modlu fiberlerde hedeften yansıyan ışığın fiber optik kablunun olduğu yerdeki görüntüsünün fiber optik kablodan büyük olmasının gösterimi (Lindelöw, 2007’den alınmıştır).

Eğer hedef Fraunhofer mesafesinden daha uzak ise hedeften gelen ışınların dalga formları (wavefront) bir düzleme yakın olacağı için odaklanan ışık fiber optik kablunun tam üzerine düşer fakat hedefin mesafesinin daha yakın olduğu durumlarda Şekil 11’de olduğu gibi bir durum ortaya çıkar. Şekilde kırmızı renkli gösterilen yer fiber optik kablunun ucunu temsil etmektedir. Burada 2 numaralı eşitlik yeterli olmayıp fiber optik kablunun üzerine düşen ışık miktarının düzeltilmesi gerekmektedir. Bu düzeltme için, düzeltme faktörü olan F tanımlanmıştır. F değeri aşağıda denklem ile bulunabilir.

$$F = \frac{A_{fiber}}{A_{proj}} \quad 3$$

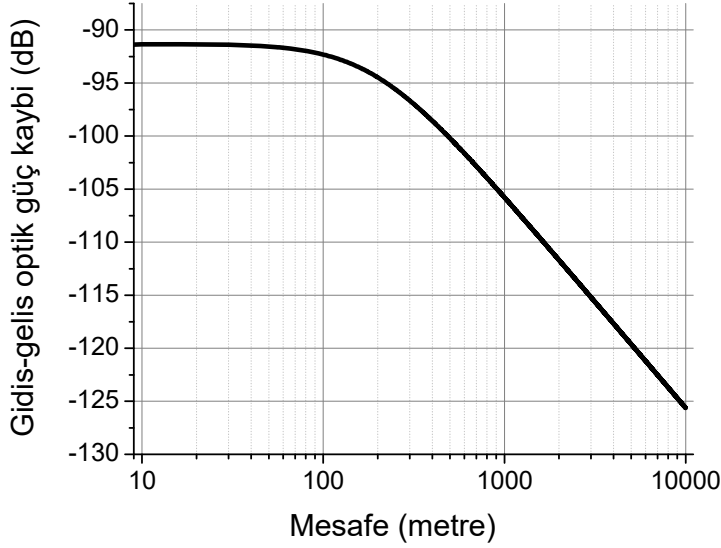
Bu denklemde A_{fiber} kolaylıkla hesaplanabilse de A_{proj} değerinin hesaplanması için bazı işlemlerin yapılması gerekmektedir.

$$A_{proj} = \pi r_{proj}^2 \quad 4$$

$$r_{proj}^2 = r_{image}^2 \left(1 + \left(\frac{\lambda d}{\pi r_{image}^2} \right)^2 \right) \quad 5$$

Bu eşitliklerde r_{image} hedefte aydınlatılan bölgenin görüntüsünün yarıçapı, d bu görüntü ile fiber optik kablo ucu arasındaki mesafedir. r_{image} ve d değerleri, geometrik optik ve Gaussian Optik kaideleri kullanılarak bulunabilir. Şekil 12’de boş uzaydan yansiyarak gelen ışığın

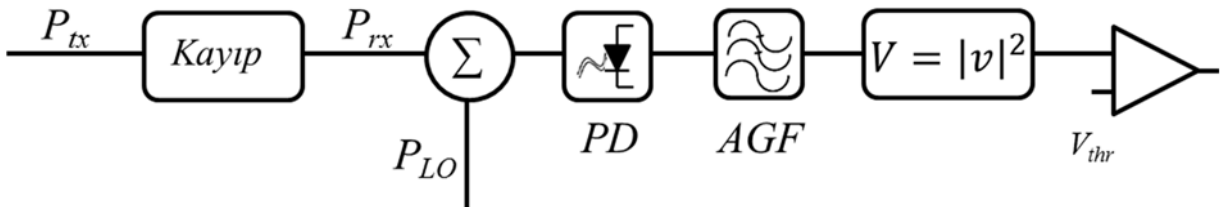
karşılaştığı kayıp ve mesafe ilişkisi gösterilmiştir. Daha ayrıntılı hesaplamalar için (Lindelöw, 2007)'e bakılabilir.



Şekil 12. Eş fazlı algılama için toplam optik kayıp, mesafe ilişik grafiği

3.3 BER hesaplanması

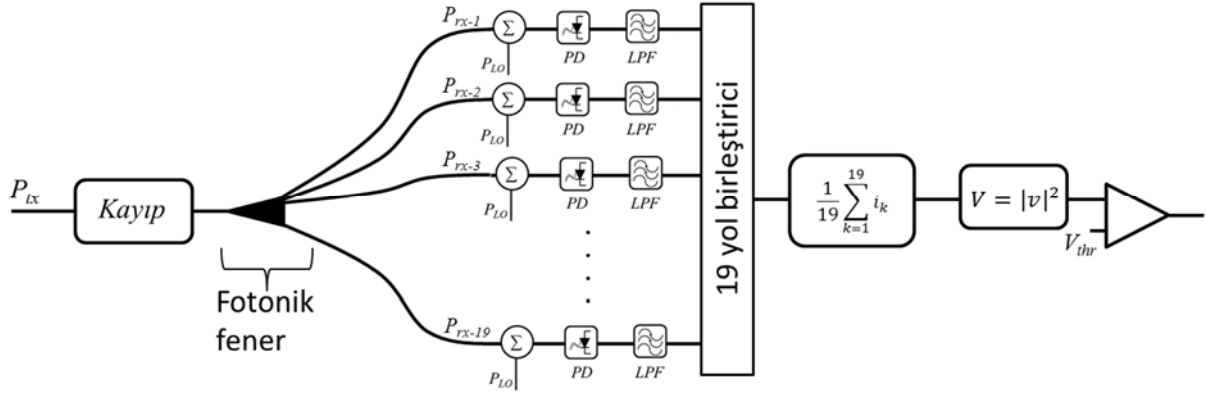
Bu çalışmada fotonik fener tabanlı eş fazlı sistemler tek modlu eş fazlı algılama sistemleri ile karşılaştırılmıştır. Bu karşılaştırma esnasında kullanılan tek modlu eş fazlı algılayıcı modeli Şekil 13'de gösterilmiştir. Bu modelde hedefe gönderilen ışık gücü (P_{tx}) ve Şekil 9'da gösterilen boş uzay gidiş geliş kayıp miktarı kullanılarak algılanan optik güç hesaplanmıştır (P_{rx}). Bu algılanan optik güç lokal osilatör (P_{LO}) ile birleştirilip duyarlılığı R olan photo detektöre gönderilir. Algılanan fotoakımının ışık yoğunluğu ile doğru orantılı olması amacı ile karesi alınmıştır.



Şekil 13. Tek modlu eş fazlı algılayıcı modeli. AGF: Alçak geçirgen filtre.

Fotonik fener tabanlı eş fazlı algılama sisteminin modeli ise Şekil 11'de verilmiştir. Burada boş uzaya gönderilen sinyal gidiş geliş optik kayba uğradıktan sonra (bu kayıp tek modlu fibere göre 8 dB daha azdır) fotonik fenere girer ve burada 19 adet tek modlu fibere dağılır.

Bu dağılım esnasında her bir fibere ne kadar güç gideceği Şekil 2'deki dağılım kullanılarak hesaplanmıştır.



Şekil 14. Fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı modeli. AGF: Alçak geçirgen filtre.

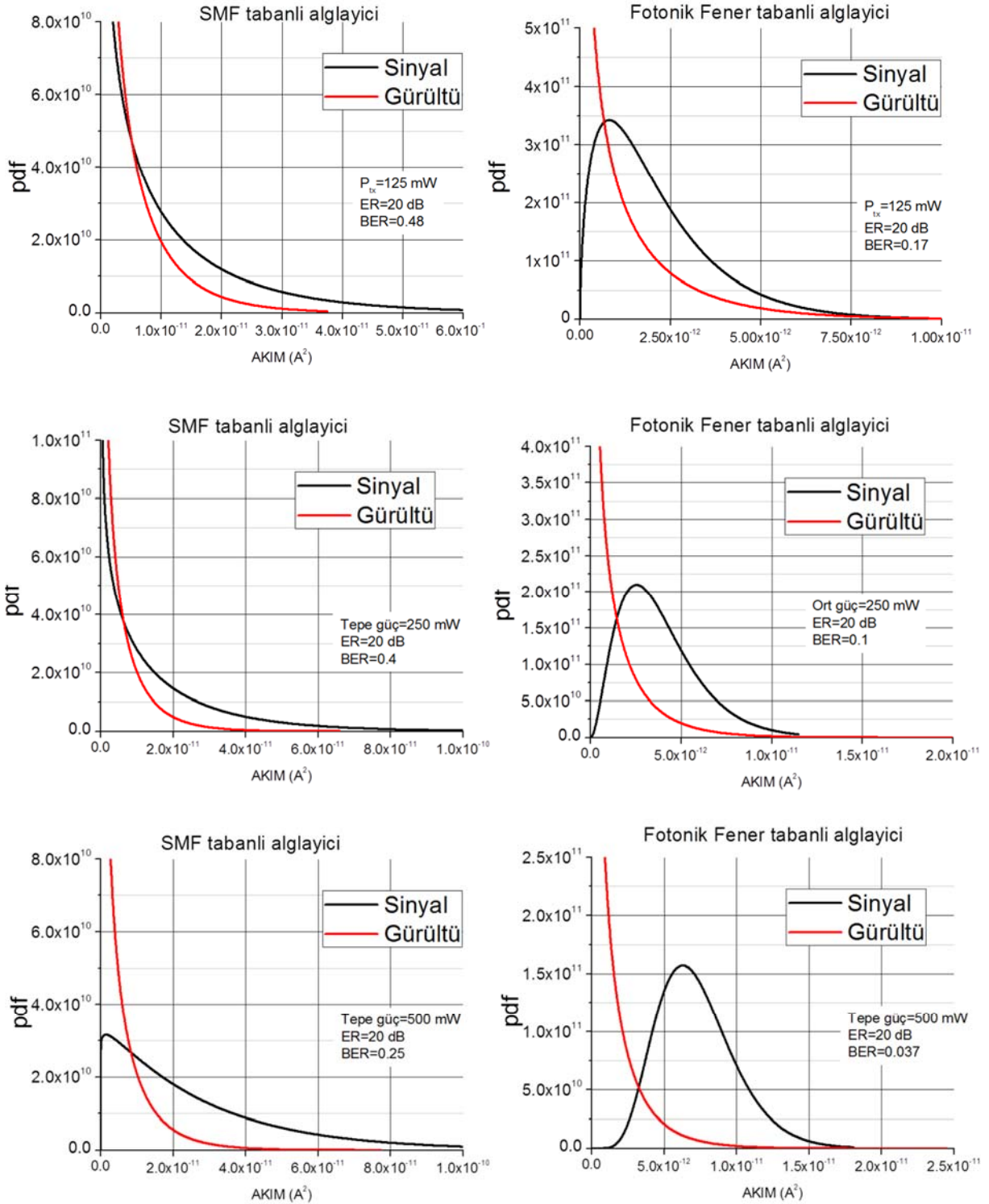
Yapılan hesaplamalarda,

Tablo 1: Hesaplamalarda alınan değerler

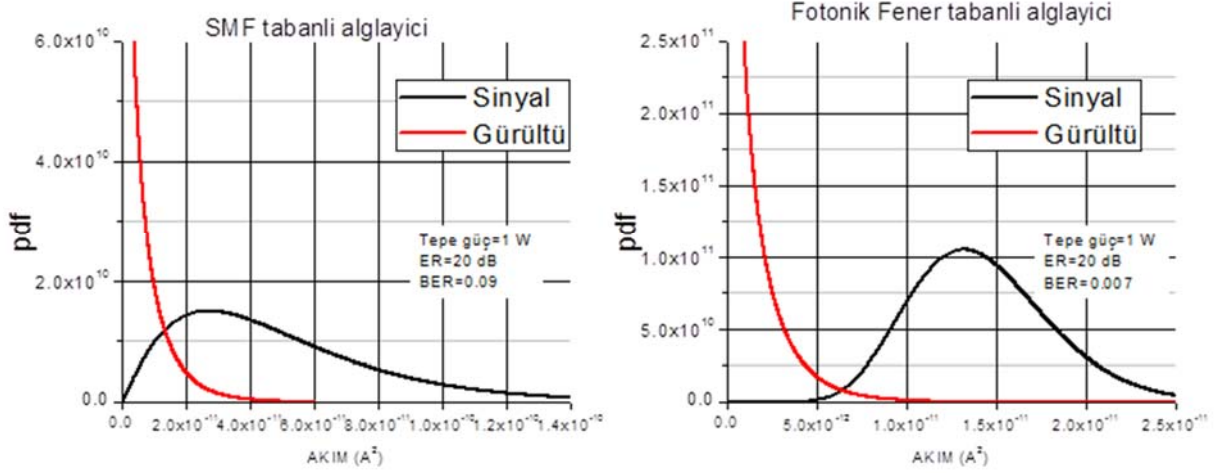
Dalga Boyu	1550 nm
Ortalama Optik çıkış gücü	10, 100, 125, 200, 250, 300, 400 ve 500 mW
Fiber optik kablo lens arası mesafe	10 cm
Soğurulma oranı	20 ve 30 dB
Hedefin yansıtma katsayısı	0.3
Fiber yarıçapı	5 μm
Ω , yansıma açısı	π (Lambertian yüzey)
Hedefe olan mesafe	100 metre

olarak alınmış ve değişik varyasyonlar incelenmiştir.

Aşağıdaki figürlerde farklı optik çıkış güçleri için PDF (probability density function) akım grafikleri görülmektedir. Örneğin optik güç 250 mW iken, tek modlu eş fazlı algılayıcıda BER değeri sistemler için kabul edilmeyen 0.4 iken fotonik fener tabanlı algılayıcıda 0.1'e düşmüştür (0.1 BER, %90 doğru algılama oranı demektir). BER 0.1 ise pek çok ticari sistemde kabul edilen değerdir (Oran & Ozdur, 2016), (gönderildi). Farklı optik güçler için sistem performans iyileştirmeleri Şekil 15 ve Şekil 16'da gösterilmiştir.



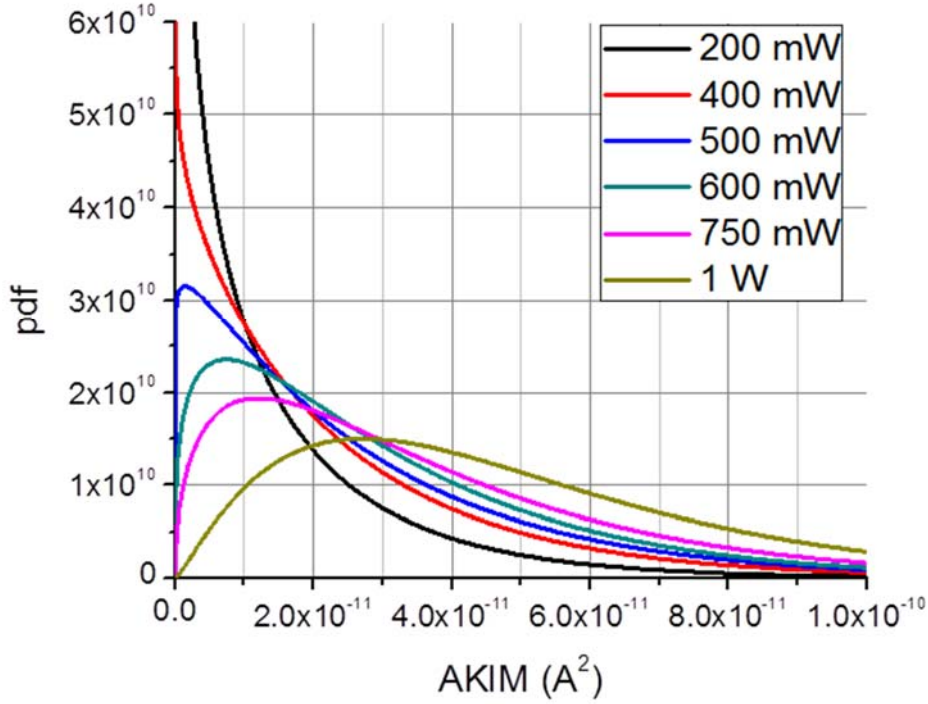
Şekil 15. 125, 250 ve 500 mW gönderilen optik güç için tek modlu ve fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı sisteminin karşılaştırması (Soğurulma oranı 20 dB)



Şekil 16. 1 W gönderilen optik güç için tek modlu ve fotonik fener tabanlı eş fazlı algılayıcı sisteminin karşılaştırması (Soğurulma oranı 20 dB)

Proje önerisinde, hesaplanan bu grafiklerin VPI fotonik tasarım yazılımı ile doğrulanması da öngörülmüştür. VPI yazılımının alınması için proje hazırlanması esnasında yurt dışından fiyat teklifi alınmış ve TL'ye çevrilerek proje bütçesine eklenmiştir. Devlet üniversitelerinde yurt dışından malzeme alınamamaktadır fakat yazılımda gümrük gibi bir problem olmayacağı için proje yürütücüsü yurt dışından yazılım alınabileceğini düşünmüş ve gelen fiyatı aynen projeye eklemiştir. Yazılımın alınması için istekte bulunulduğunda ise Abdullah Gül Üniversitesinden yurt dışından hiçbir şekilde alım yapılamayacağını öğrenmiştir. Normalde 1 yıllık satın alınacak yazılımın süresinin kısaltılarak fiyat teklifi aracı firma vasıta ile alınmaya çalışılsa da gerek kur farkı gerekse de aracı firma masrafları nedeniyle fiyat çok artmış dolayısıyla da bu program satın alınamamış ve sonuç karşılaştırması yapılamamıştır. Karşılaştırma yapılamasa da Matlab üzerinde yapılan benzetim çalışmalarının güvenilirliğinden şüphe bulunmamaktadır.

Bu projede ayrıca optik güç arttıkça olasılık yoğunluk fonksiyonundaki değişimde gözlemlenmiştir (Şekil 17). Dağılımı Gauss olan bir sinyal serisinin karesinin dağılımı ile ilgili bir analitik çözüme ulaşılamamıştır. Bunun yerine her bir optik güçteki dağılım başka bir analitik dağılıma benzetilmiştir.



Şekil 17. Optik güç arttıkça olasılık yoğunluk fonksiyonundaki değişim.

3.4 Fotonik Fenerlerin Sistem Parametrelerine Olan Katkısının İncelenmesi

Fotonik fenerler kullanıldığında SNR değerinde yaklaşık 6 kat bir iyileşme gözlemlenmektedir. Sistem değerlerinde değişiklik yapılmadan bu 6 katlık iyileşme doğrudan daha yüksek çözünürlük ve daha yüksek hız olarak kullanılabilir. Bunun yanında bazı uygulamalarda en yüksek performanslı sistem yerine ağırlık, küçüklük ve az enerji tüketimi gibi değerler öne çıkabilmektedir. Bu uygulamalara gösterilebilecek en güzel örnek mikro ve nano İHA araçlarına monte edilen cihazlardır. İHA platformlarındaki en önemli değerler kullanılacak sensörlerin ağırlık ve güç tüketim değerleridir.

3 boyutlu LIDAR sistemlerinde en büyük bileşenlerden birisi kullanılan lensin çapıdır. Lens çapında olabilecek $\sqrt{2}$ katlık bir artış algılanan optik gücün 2 kat artmasına sebep olacaktır bu da SNR değerinde 4 katlık bir iyileşme demektir. Fakat yukarıda belirttiğimiz uygulamalarda optik lensin boyutu her zaman arttırılamamaktadır. Bu projede üzerinde çalışılan sistemde ise kullanılan fotonik fenerden dolayı tek modlu fibere göre daha fazla optik güç elde edilmiş ve bu optik fazlalığı nedeniyle SNR değerinde 6 katlık bir iyileşme hesaplanmıştır. Elde edilen bu 6 katlık gelişme daha yüksek çözünürlük veya daha hızlı sistem için kullanılabilir. Diğer yandan SNR'daki gelişme sistem performansı aynı kalarak daha küçük ve hafif sensörlerinin yapımını sağlayabilir.

Bu proje önerisinde kullanılan sensörde yaklaşık 6 kat daha sinyal gürültü oranı elde edilmiştir. LIDAR sistemlerinde SNR değeri algılanan optik gücün karesi ile doğru orantılı olduğu için lens alanında yapılacak olan $\sqrt{6}$ (2.45)'lik bir küçültme aynı SNR ile sonuçlanacaktır. Bu da lens çapında yaklaşık 1.5 kat küçülme demektir. Diğer bir deyişle fotonik fener kullanan 1 birim çapında lense sahip bir LIDAR sensörünün SNR değeri ile tek modlu fiber kullanan 1.5 birim çapında lense sahip LIDAR sensörünün SNR değeri aynıdır. Fotonik fener sistemlerinde lens çapı küçültülebilmesine rağmen eklenecek olan fazladan bileşenler ağırlığı ve hacmi artıracak olarak görülebilir. Bu problemi çözmek için fotonik fener sistemlerinin fotonik entegre devreleri ile yapılmaları gerekmektedir. Fotonik entegre devre kullanılarak yapıldıklarında ise hacim ve ağırlık olarak fazla yer tutmayacaklardır.

Hacim ve büyüklük parametrelerinin yanında diğer bir önemli parametrede güç tüketimidir. Fotonik fener kullanılarak %90 doğruluk oranına ulaşılan 250 mW optik güç durumunu ele alarak yaptığımız çalışmada güç tüketimi açısından fotonik fener sistemlerinin az da olsa avantajlı olduğu ortaya çıkmıştır. Fotonik fenerde 250 mW optik güç ile elde edilen performans tek modlu fener ile elde edilmek istendiğinde $250 \times 2.45 = 612.5$ mW değerinde optik güç gerekecektir. Diğer yandan fotonik fener sisteminde 19 adet lokal osilatörler vardır ve her birine 10 mW gönderileceği düşünüldüğünde toplamda 190 mW etmektedir. Bütün değerler topladığımızda aynı SNR ve lens boyutu için fotonik fenerde $250 + 19 \times 10 = 440$ mW değerinde optik güç gerekirken tek modlu fiber kullanılan sistemde $612.5 + 10 = 622.5$ mW değerinde optik güç gerekmektedir. Burada her iki sistemde de lokal osilatöre gönderilen optik gücün tek bir kaynaktan alındığı düşünülmüştür.

Özetlenecek olduğunda fotonik fener sistemlerinin ağırlık, hacim ve güç olarak bazı avantajları olacağı bellidir fakat bu avantaja sadece çok pahalı olan fotonik entegre devreler ile ulaşabilme potansiyelleri vardır. Fotonik fenerler ile çalışacak bir LIDAR sisteminin yapılması için istenilen performans gelişimine ya da boyut, ağırlık iyileştirmesine gerçekten ihtiyaç olması gerekmektedir aksi takdirde maliyet artışının kendini doğrulatması zordur. Projenin bir sonraki aşaması deneysel olarak fotonik fenerlerin gerçek zamanlı gerçekleştirilmesidir. Laboratuvar ortamında bunu gerçekleştirmek için eş zamanlı çalışacak 19 adet eş fazlı algılayıcı sistem olması gerekmektedir (Proje yazarının yayınladığı bir önceki makalesinde tek bir eş fazlı algılayıcı kullanılmış ve tek modlu fiber optik kablolar ayrı ayrı çıkartılıp takılmıştır). Bunun maliyetinin yüksek olacağı açıktır. Bu denemenin yapılması için gerekçenin iyi oluşturulması gerekmektedir.

19 fiberli bir fotonik kullanmak yerine 3 ya da 5 adet tek modlu fibere sahip bir fiber optik kablo ile birkaç modlu fiber (few mode fiber) kullanmak daha doğru olacaktır. Böyle tek modlu fiber



sayısının daha az durumda boş uzaydan gelerek fibere birleşen ışığın miktarı daha az olacaktır fakat sistemde gerçekleştirilecek olan basitlik göz önüne alındığında tercih edilebileceğini düşünmekteyiz.

4. SONUÇ

Bu çalışmada boş uzay eş fazlı algılama sistemlerinin performanslarını arttırmak için patenti alınan (US 9322992) fikrin sistem seviyesinde nasıl geliştirmelere sebep olacağı araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda fotonik fener tabanlı sistemlerin sinyal gürültü oranına önemli şekilde katkı sağladıkları bulunmuştur. Bu sinyal gürültü oranındaki gelişimi asıl önemli parametre olan hata oranına çevirmek için yoğun çalışmalarda bulunulmuş ve sonuçlar proje raporunda sunulmuştur. Hata oranındaki değişim farklı optik güçlerde farklı değerlerde olmuştur. Örneğin 250 mW gönderilen optik güç için hata oranı %40 dan, bu tarz sistemler için kabul edilebilir olan %10 seviyesine indirilmiştir. Ayrıca fotonik fenerlerin ağırlık güç tüketimi gibi parametrelere katkısı da araştırılmış ve en büyük katkılarının aynı performans için gereken 1.5 kat daha kısa çapı olan lens olduğu değerlendirilmiştir.

Öneriler: Bu projede kullanılan fotonik fener 19 tek modlu fibere sahip olduğu için fotonik entegre devreler dışında gerçek zamanlı gerçekleştirilmesi zor bir sistemdir. Bu sorunun aşılması için 3 ya da 5 fiberli fotonik fenerler kullanılabilir. Bu ürünler ticari olarak da sunulmaktadır ve kolaylıkla elde edilebilmektedir. Bu tür az sayıda tek moda sahip olan fotonik fenerlerde birkaç modlu (few mode fibers) fiberler kullanılmaktadır. Bunun yanında bu tarz ürünlerin son zamanlarda etkin biçimde optik iletişim linklerinde kullanılmaya başlanması umut vericidir. Bu tür fiberlerde boş uzaydan gelen sinyal yine düşük kayıp ile fotonik fenere birleştirilecektir. Proje yürütücüsünün LIDAR konusundaki bundan sonraki AR-GE planı birkaç modlu (few mode fibers) fiberler kullanarak sistem performansında gelişim sağlamak ve bunu gerçek zamanlı olarak göstermektir.

Proje yürütücüsü 19 adet fiber optik kablonun teknik zorluklarını 3 ya da 5 adet fiberden oluşan birkaç modlu fiber kullanarak aşmayı planlamaktadır. Bu önerisini ise Nisan ayında kurmuş olduğu ArtıBir Ar-Ge firması üzerinden başka ortak kuruluşlarla beraber 1511-BIT-MNOE-2015-2 kodlu projeye başvurarak gerçekleştirmeyi düşünmektedir. Bu projede “GPS+INS entegrasyonu yapılmış LiDAR sistemleri” geliştirilmesi amaçlanmaktadır. Bu önerilecek proje dahilinde yapılacak olan sisteminin 3 ya da 5 modlu eş fazlı bir sistem olacağını planlamaktayız.

KAYNAKLAR

- Aleshire, C., Montoya, J., Hwang, C., Fontaine, N. K., Martz, D. H., Fan, T. Y., & Ripin, D. (2016). Photonic Lantern Mode Control in Few-Moded Fiber Amplifiers Using SPGD. In *Conference on Lasers and Electro-Optics* (p. SM2Q.6). Washington, D.C.: OSA. http://doi.org/10.1364/CLEO_SI.2016.SM2Q.6
- Bland-Hawthorn, J., Ellis, S. C., Leon-Saval, S. G., Haynes, R., Roth, M. M., Löhmansröben, H.-G., ... Trinh, C. (2011). A complex multi-notch astronomical filter to suppress the bright infrared sky. *Nature Communications*, 2, 581. <http://doi.org/10.1038/ncomms1584>
- Bland-Hawthorn, J., & Kern, P. (2012). Molding the flow of light: Photonics in astronomy. *Physics Today*, 65(5), 31–37. <http://doi.org/10.1063/PT.3.1558>
- Fontaine, N. K., & Ryf, R. (2013). Characterization of Mode-Dependent Loss of Laser Inscribed Photonic Lanterns for Space Division Multiplexing Systems. *2013 18th OptoElectronics and Communications Conference Held Jointly with 2013 International Conference on Photonics in Switching (2013), Paper MR2_2, MR2_2*.
- Leon-Saval, S. G., Birks, T. a, Bland-Hawthorn, J., & Englund, M. (2005). Multimode fiber devices with single-mode performance. *Optics Letters*, 30(19), 2545–2547. <http://doi.org/10.1364/OL.30.002545>
- Leon-Saval, S. G., Fontaine, N. K., Salazar-Gil, J. R., Ercan, B., Ryf, R., & Bland-Hawthorn, J. (2014). Mode-selective photonic lanterns for space-division multiplexing. *Optics Express*, 22(1), 1036. <http://doi.org/10.1364/OE.22.001036>
- Lindelöw, P. (2007). Fiber Based Coherent Lidars for Remote Wind Sensing, (November).
- Noordegraaf, D., Skovgaard, P. M. W., Maack, M. D., Bland-Hawthorn, J., Haynes, R., & Laegsgaard, J. (2010). Multi-mode to single-mode conversion in a 61 port Photonic Lantern. *Optics Express*, 18(5), 4673–4678. <http://doi.org/10.1364/OE.18.004673>
- Noordegraaf, D., Skovgaard, P. M. W., Sandberg, R. H., Maack, M. D., Bland-Hawthorn, J., Lawrence, J. S., & Lægsgaard, J. (2012). Nineteen-port photonic lantern with multimode delivery fiber. *Optics Letters*, 37(4), 452. <http://doi.org/10.1364/OL.37.000452>
- Oran, A., & Ozdur, I. (2016). BER improvement of photonic lantern based coherent receivers. In *IEEE PHOTONICS CONFERENCE, 29TH ANNUAL CONFERENCE OF THE IEEE PHOTONICS SOCIETY 2 - 6 October 2016*. Waikoloa, Hawaii: IEEE Photonics Conference.
- Ozdur, I., Toliver, P., Agarwal, A., & Woodward, T. K. (2013). Free-space to single-mode collection efficiency enhancement using photonic lanterns. *Optics Letters*, 38(18), 3554–7. <http://doi.org/10.1364/OL.38.003554>
- Ryf, R., Mestre, M. a., Randel, S., Palou, X., Gnauck, A. H., Delbue, R., ... Lingle, R. (2013). Combined SDM and WDM transmission over 700-km Few-Mode Fiber. *Optical Fiber Communication Conference/National Fiber Optic Engineers Conference 2013, OW11.2*. <http://doi.org/10.1364/OFC.2013.OW11.2>
- Toliver, P., Ozdur, I., Agarwal, A., & Woodward, T. K. (2013). Comparison of LIDAR system performance for alternative single-mode receiver architectures: Modeling and experimental validation. In *Proceedings of SPIE - The International Society for Optical*



Engineering (Vol. 8731). <http://doi.org/10.1117/12.2020840>

Woodward Ted K. , Toliver Paul, Ozdur Ibrahim. (2016). Devices and methods for multimode light detection.

**TÜBİTAK
PROJE ÖZET BİLGİ FORMU**

Proje Yürütücüsü:	Doç. Dr. İBRAHİM TUNA ÖZDÜR
Proje No:	114E402
Proje Başlığı:	Fotonik Fener Tabanlı Eş-Fazlı Alıcı Performans Analizi
Proje Türü:	3001 - Başlangıç AR-GE
Proje Süresi:	18
Araştırmacılar:	
Danışmanlar:	
Projenin Yürütüldüğü Kuruluş ve Adresi:	ABDULLAH GÜL Ü. MÜHENDİSLİK VE DOĞA BİLİMLERİ F. ELEKTRİK ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ B.
Projenin Başlangıç ve Bitiş Tarihleri:	01/10/2014 - 01/04/2016
Onaylanan Bütçe:	53262.0
Harcanan Bütçe:	10366.69
Öz:	<p>Boş uzay eş fazlı algılama sistemlerinin performanslarını arttırmak için fotonik fenerli sistemler önerilmiştir (US 9322992). Bu projede fotonik fenerli eş fazlı alıcıların sistem performansına nasıl katkı yaptıkları incelenmiş ve sonrasında sistem seviyesinde nasıl geliştirmelere sebep olacağı araştırılmıştır. Bu çalışma sonucunda fotonik fener tabanlı sistemlerin sinyal gürültü oranına önemli şekilde katkı sağladıkları bulunmuştur. Bu sinyal gürültü oranındaki gelişimi asıl önemli parametre olan hata oranına çevirmek için yoğun çalışmalarda bulunulmuş ve sonuçlar proje raporunda sunulmuştur. Hata oranındaki değişim farklı optik güçlerde farklı değerlerde olmuştur. Örneğin 250 mW gönderilen optik güç için hata oranı kabul edilmeyen %40 dan, bu tarz sistemler için kabul edilebilir olan %10 seviyesine indirilmiştir. Ayrıca fotonik fenerlerin ağırlık güç tüketimi gibi parametrelere katkısı da araştırılmış ve en büyük katkılarının aynı performans için gereken 1.5 kat daha kısa çapı olan optik lens olduğu değerlendirilmiştir.</p>
Anahtar Kelimeler:	LIDAR, 3 boyutlu görüntüleme, eş fazlı algılayıcılar
Fikri Ürün Bildirim Formu Sunuldu Mu?:	Hayır
Projeden Yapılan Yayınlar:	1- Photonic-lantern-based coherent LIDAR system (Makale - Diğer Hakemli Makale),