

Güdümlü Roketler için Hassas RF Algılayıcı Ailesi Tasarım ve Gerçekleştirilmesi

Y. Barış Yetkil¹, Şimşek Demir^{1,2}, Birkan Dağdeviren³, Burcu Dönmez³

¹PRF ArGe A.Ş., Ankara

²Orta Doğu Teknik Üniversitesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Ankara

³Roketsan A.Ş., Ankara

ybyetikil@prfarge.com.tr, simsek@metu.edu.tr, birkan.dagdeviren@roketan.com.tr,
burcu.donmez@roketan.com.tr

Özet: Hedef üzerinde etkinliğinin artırılması için roket ve benzeri mühimmatlarda yere olan mesafenin ölçülmesi kritiktir. Bu mesafenin ölçülmesi için farklı yöntemler kullanmak mümkün olsa da konvansiyonel yöntem RF algılayıcı kullanılmaktadır. Ulusal savunma sanayinin ihtiyaçları doğrultusunda farklı platformlara uygulanabilir, hassasiyeti ayarlanabilir, kompakt ve düşük maliyetli RF algılayıcı ailesi tasarlanmıştır. Bu bildiride tasarım ve üretimde kritik noktalar anlatılacak ve ölçüm sonuçları sunulacaktır.

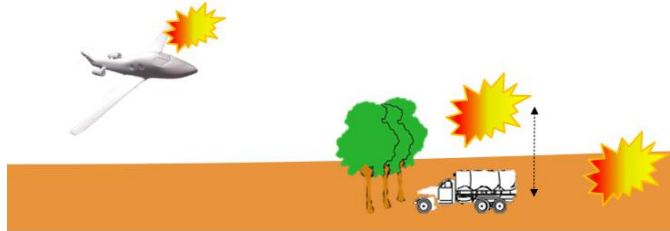
Abstract: For guided missiles and similar ammunitions, measurement of height of burst is critical for improving the effectiveness on target. For measuring the height of burst various methods could be utilized, however; conventional method is use of RF sensors. Considering the requirements of the national defence industry a family of RF sensors is designed. Applicability to different platforms, adjustment of accuracy, compactness and cost are the prime concerns. In this paper critical points in the design and production are discussed and measurement results are presented.

1. Giriş

Roketlerde hedefe yönelim için arayıcı başlıklar bulunabilmektedir. Bu arayıcı başlıklar genelde optik temelli olmakla beraber bazı uygulamalarda RF arayıcıların kullanıldığı da bilinmektedir. Arayıcı başlık hedefe yönelimi sağlarken, hedefe varmayı tespit eden tetikleme mekanizmaları ayrıca bulunmaktadır. Çarpma temelli tetikleme kullanıldığında mühimmatın hedef üzerinde etkisi sınırlı kalmaktadır. Hedefin korunaklı olup olmaması, dağılık ya da toplu olması gibi parametrelere bağlı olarak tetiklemenin hedefe olan mesafesi etkinliği belirleyici olmaktadır, Şekil 1. Hedefe olan mesafe yere olan mesafe ile ilişkilendirilmektedir.

Yere olan mesafenin RF algılayıcı ile ölçülmesi için Doppler etkisinden yararlanmak mümkün olabileceği gibi, temel radar teknikleri kullanılarak zaman gecikmesinin ölçülmesi de mümkündür. Zaman gecikmesinin ölçülmesinde FMCW ve benzeri tekniklerin kullanılması kolaylık sağlamaktadır [1], [2]. Modülasyon fonksiyonlarının farklı seçilmesi mümkündür. Doğrusal FMCW kullanımının uygulamaları üzerine bazı çalışmalar daha önce yayınlamıştır [3], [4].

Ölçümün çok kısa mesafeler için gerçekleştirilmesi önemli bir problemdir. Platformların hızlı olması nedeni ile ölçüm kararının oluşturulmasındaki gecikmenin kısa olması kritiktir. Ayrıca kısa mesafe olması nedeni kargaşa, spur ve gürültü sonucunda spektrumda kirlilik oluşmasına ve spektrum tabanının yükselmesine neden olmaktadır. Bunun sonucunda ölçümde hataya yol açmaktadır. Bu hatanın azaltılması ve yüksek çözünürlükte mesafe ölçümü yapılması için özel teknikler kullanılması gerekmektedir.



Şekil 1. Roket ve benzeri mühimmatta yakın mesafe ölçüm kullanımına ilişkin şematik gösterim

Bu yazıda anlatılan sistemde ters testere dişi ve üçgen biçimde doğrusal FMCW kullanılmıştır. Antenden başlayarak, mesafe kararı veren sayısal sisteme kadar tüm birimleri gerçekleştirilmiştir. Masaüstü işlevsellik testi ve platform üzerinde uçuşlu test yapılmıştır. Farklı senaryoların kantitatif testine olanak sağlayacak transponder benzeri bilgisayar kontrollü bir test cihazı geliştirilmiştir. Bu cihaz kullanılarak çoklu sayılarda test ile ölçüm

doğruluğunun ve hata mekanizmalarının stokastik dağılımları da incelenmiştir. Konferans sunumu sırasında daha fazla görsel veri sunulacak olmakla beraber mevcut yazıda sistem tasarımı, anten tasarımı, RF yapı tasarımı, elektronik devre tasarımı konuları devam eden kısımlarda sunulmaktadır.

2. Sistem Tasarımı

RF algılayıcı ile beş farklı biçimde mesafe ya da yakınlık ölçümü yapılabilir. Kapasitif değişim algılayıcısı ile yere yaklaşıldığının tespiti en eski yöntemlerden bir tanesidir. Yere yaklaşan bir platformda yerden yansıma üzerinde Doppler etkisi olacağı ve bu etkinin genliği yere mesafe ile orantılı olduğu için Doppler frekansı bölgesinde genliğin takibi ile yakınlık belirlenmesi ikinci konvansiyonel yöntemdir. Üçüncü bir yöntem doğrusal frekans modülasyonu kullanarak vurum frekansını takip etmektir. Dönen işarette elde edilen vurum frekansı mesafe ile doğru orantılıdır. Vurum işaretine FFT uygulanması ve dominant frekansın bulunması bir uygulamadır [2]. Dördüncü bir yöntem, farklı bir frekans ölçüm tekniği kullanımı ile, vurum işaretinin zamanda sıfır geçişlerinin takibidir. Sıfır geçişlerinin takibi ile vurum frekansı basit bir sayaç ile bulunabilir [1]. Beşinci bir yöntem ise serbest düşüş yapan bir platformda dönen işaret genliğinin zamana göre değişiminin takibidir. Hassas ölçüm sonuçları alınabileceği anlaşılacakla beraber uygulaması henüz açık yazında görülmemiştir [5]. Anılan teknikler dışında da farklı tekniklerin geliştirilmesi mümkündür.

Yapılan çalışmada farklı platform gereksinimlerine göre yanıt verebilecek farklı RF yükseklik ölçme yöntemleri uygulanmıştır. Bu yazıda doğrusal ve ters testere dışı modülasyon ile hassas mesafe ölçümü yapan uygulama detaylı olarak anlatılmıştır.

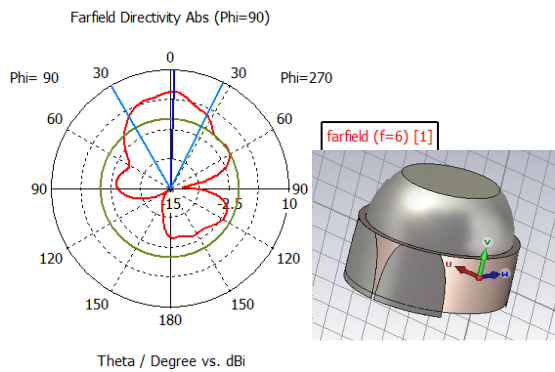
Sistem gereksinimi olarak 1 Mach platform hızında yerden yüksekliğin 3m-50m aralığında $\pm 1m$ doğrulukla ölçülmesi belirlenmiştir. Uygulama frekansı olarak C-bant (4-8GHz) seçilmiştir. Mesafe belirlenmesinde FFT uygulaması yapılmıştır. I/Q almaç kullanılmadığı için Doppler nedeni ile negatif frekans oluşmaması için önlem alınması gereklidir.

$$f_b - f_d > 0 \quad (1)$$

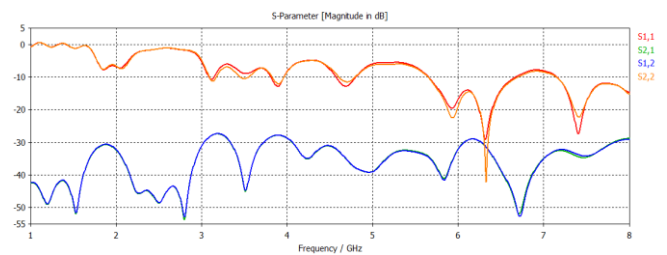
$$\frac{2 R_{min}}{c} \cdot \frac{\Delta f}{T_m} - \frac{2 v}{c} \cdot f_o > 0 \quad (2)$$

$$6 \times 10^9 > f_o \quad (3)$$

Buradan görüleceği üzere 6GHz ve altında bir frekans seçmek önemlidir. Frekans bandı seçiminde, aşağıda detayları verildiği üzere, özellikle anten açısından platform üzerinde yerleşim alanının kısıtlı olması ve üretilebilirlik koşulları da belirleyici olmuştur. Ölçüm doğruluğunun sağlanabilmesi için 300MHz anlık bant genişliği kullanılmış ve 2kHz modülasyon frekansı belirlenmiştir. Bu sayede 0.5m çözünürlük elde edilmiştir. 0.5us modülasyon periyodunda bir frekans bilgisi üretilebilmektedir. Tekrarlı takip eden ölçümlerden ortalama olarak bir mesafe verisi üretmek doğruluk artırılmıştır. 6 örnekten bir ölçüm verisi üretilmiştir. Dolayısı ile 3us veri toplama gereksinimi oluşmuştur. Veri toplama sürecinde platform 0.17m yer değiştirebilmektedir. Sonuç olarak $\pm 1m$ ölçüm doğruluğu sağlanabilmektedir.

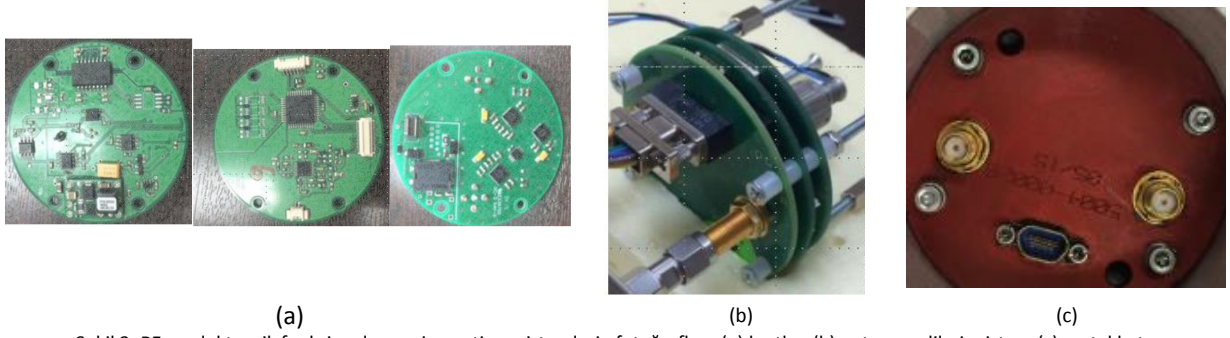


(a)



(b)

Şekil 2. Konformal açıklık anten benzetim sonuçları (a) Işınım örüntüsü (b) port parametreleri (yansıma kaybı ve bağlaşım)



Şekil 3. RF ve elektronik fonksiyonları yerine getiren sistemlerin fotoğrafları. (a) kartlar, (b) entegre edilmiş sistem (c) metal kutu

3. Anten Tasarımı

Platform üzerinde ağırlık, hacim ve yüzey kullanımı konusunda önemli sınırlamalar söz konusudur. Benzer platformlarda farklı gereksinimlere göre tasarlanmış anten yapıları açık yazında bulunmaktadır [6]-[9]. Burun tarafında arayıcı başlık yer aldığı için, gövde üzerinde etkin bir alan kullanımı için konformal anten tasarımı tercih edilmiştir [6]. Anten benzetimi CST yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Kullanılan geometri, sonuçta elde edilen ışınım örüntüsü ve frekansa bağlı yansıma katsayısı Şekil 2’de verilmiştir. Şekilde görüldüğü üzere açıklık tipi anten yapısı roketin silindirik yüzeyinde dielektrik katman üzerinde metal kaplama ile yapılmıştır. Açıklık antene bağlaşım alt yüzeyden mikroşerit hat üzerinden yapılmaktadır.

4. RF ve Elektronik Kart Tasarımı

Sayısal kontrollü VCO kullanılarak üçgen biçimli doğrusal FMCW işaret oluşturulmaktadır. Üçgen geçiş noktalarında keskin frekans değişimi sağlanamaması durumunda vurum işaretinde istenmeyen kirlenmeler olmaktadır. Benzer şekilde VCO çıkışında alınan işaretin frekans ve genliğinin uygulanan gerilime göre doğrusal değişmemesi durumunda FMCW modülasyonu vurum işaretinde gözlenmektedir. Kullanılan VCO’nun ölçüm ve karakterizasyonuna dayalı düzeltme uygulaması yapılmasının gerekli olduğu görülmüştür. Frekansın doğrusal değişimi için uygulanan gerilim ön-bozulma ile uygulandığında spektrumda düzelme elde edilmektedir. Benzer şekilde ADC ile vurum işaretinin işlemciye alınması aşamasında sayısal kazanç kontrolü ile genlik değişimi etkisi azaltılabilmektedir. Bu tür spektrum kirlenmeleri DC bölgesine yakın bir spektrum yükselmesine neden olmaktadır. Yakın mesafe ölçümleri de DC bölgesine yakın vurum frekansı yarattığı için hatalı ölçüm sonuçlarına yol açılabilmektedir.

Platform hızları yüksek olduğunda, özellikle yakın mesafelerde vurum frekansı içerisinde Doppler frekansı belirgin olmaktadır. Bu etkiyi azaltmak için ters testere dişi modülasyon uygulanmasının avantaj yarattığı gözlenmiştir. Sunumlarda detaylı analiz yer alacaktır.

Elektronik sistem üç kart halinde üretilmiş ve entegre edilmiştir. Üretilen sisteme ilişkin fotoğraflar Şekil 3’te görülmektedir.



(a)



(b)

Şekil 4. Quadcopter ile ölçüm deneyine ilişkin fotoğraflar (a) telemetri sistemi ile beraber entegre edilmiş ölçüm birimi (b) RF algılayıcı taşıyan uçuş halinde quadcopter

5. Sistem Performans Ölçümleri

Oluşturulan sistemin işlevselliğini sınamak üzere üç aşamalı bir uygulama yapılmıştır. İlk aşamada laboratuvar ortamında testler gerçekleştirilmiştir. Gönderme-alma birimleri arasında gecikme ve genlik kontrollü bir kablo

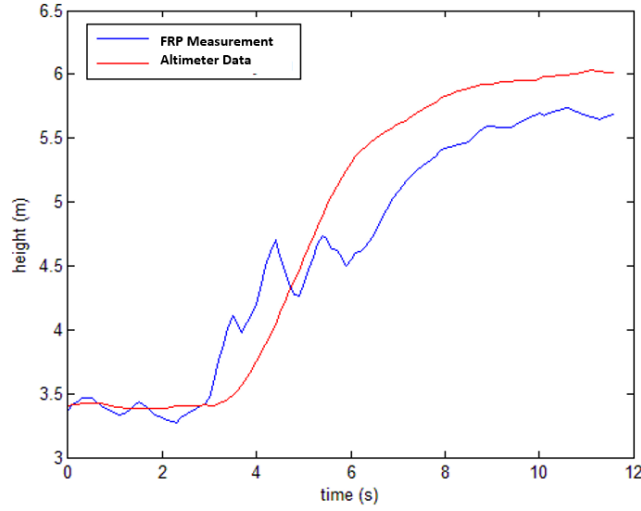
bağlantısı sağlanmıştır. Ölçümlerin tutarlı olmasını müteakip olarak bir quadcopter uçuşu gerçekleştirilmiştir. Şekil 4'te uygulama detayları görülmektedir. Quadcopter üzerinde olan altimetre ve üretilen sistem ayrı ayrı sonuç üretmiştir. Şekil 5'te alınan ölçümlerin karşılaştırması görülmektedir. Görüldüğü üzere hassas bir mesafe ölçümü yakın mesafede sağlanabilmektedir. Quadcopter yükselme hızı uygulamada kullanılacak platform hızlarının çok altında kaldığı için gerçekçi senaryoda ölçüm performansını sınamak için özel bir test cihazı geliştirilmiştir. PROTES cihazında gönderme alma antenleri ile doğrudan bağlaşılan ikinci bir set anten kullanılmıştır. PROTES'in aldığı işaret frekans ve genlik olarak modüle edilerek platform hareketini emüle etmektedir. PROTES gönderme anteni ile platforma aktarım sağlanmaktadır. Haberleşme konnektörü üzerinden ölçüm performansı izlenmektedir. Beklenen performansın sağlanması üzerine çevresel koşul testlerine girilerek tasarım doğrulanması da sağlanmıştır.

6. Sonuç

Ulusal savunma sanayinin gereksinimleri doğrultusunda 3m ila 50m arasında $\pm 1m$ çözünürlükte yere mesafeyi ölçen RF algılayıcı yapılmıştır; farklı platform gereksinimlerine yanıt verecek şekilde varyasyonları ile beraber üretilmiştir. Sunum sırasında daha detaylı sayısal bilgiler sunulacaktır.

Teşekkür

Quadcopter ölçümleri için olanak yaratan Prof. Dr. Kemal Leblebicioğlu'na ve ekibine teşekkür ederiz.



Şekil 5. Quadcopter uçuş deneyinde elde edilen yükseklik verisi (kırmızı: quadcopter altimetre verisi, mavi: RF algılayıcı verisi)

Kaynaklar

- [1] S. Kurt, S. Demir, A. Hizal, "Zero Crossing Counter for Accuracy Improvement of FMCW Range Detection," Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, vol 16, no.2, 2008.
- [2] M. Secmen, S. Demir and A. Hizal, "Dual-Polarized T/R Antenna System Suitable for FMCW Altimeter Radar Applications", IEE Proc.-Microw. Antennas Propag., Vol 153, No 5, October 2006, pp 407-412.
- [3] Hizal, A., Demir, S., "Pulsed FMCW Waveform Design for LPI Radars Based on Stretch Processing", European Radar Conference, Amsterdam, Netherlands, Oct. 2012.
- [4] M. Secmen, S. Demir, A. Hizal, N. Candan, "Comparison of the Detection Performance of an FMCW Coastal Surveillance Radar for V and H Polarizations", IRS2006, Int. Microwave and Radar Symposium, Krakow, Poland, 24-26 May 2006, pp 291-294.
- [5] Aydın Vural tez.
- [6] Pan, Jing Yuan, et al. "Analysis and design of a new conformal slot antenna for proximity fuze." Applied Superconductivity and Electromagnetic Devices (ASEMD), 2013 IEEE International Conference on. IEEE, 2013.
- [7] Zainud-Deen, Saber Helmy, Hend Abd El-Azem Malhat, and Kamal Hassan Awadalla. "Dielectric resonator antenna mounted on a circular cylindrical ground plane." Progress In Electromagnetics Research B 19 (2010): 427-444.
- [8] Zivanovic, Bojana, Thomas M. Weller, and Carlos Costas. "Series-Fed Microstrip Antenna Arrays and Their Application to Omni-Directional Antennas." Antennas and Propagation, IEEE Transactions on 60.10 (2012): 4954-4959.
- [9] Liu, Yuan-Yun, Min Guo, and Shun-Shi Zhong. "Conformal slotted waveguide array antenna." Antenna Technology (iWAT), 2012 IEEE International Workshop on. IEEE, 2012.