

İNSANSIZ HAVA ARACI VE PARÇACIK FİLTRESİ İLE RF SİNYAL KAYNAĞININ LOKALİZASYONU

Mehmet Hasanzade¹, Ömer Herekoğlu², Ramazan Yeniçeri³, Emre Koyuncu⁴, Gökhan İnalhan⁵
İstanbul Teknik Üniversitesi

ÖZET

Bu çalışmada geniş bir arazide konumu bilinmeyen bir RF sinyal kaynağının, insansız hava aracı (İHA) ile parçacık filtresi kullanılarak konum tespitinin yapılabilmesi amaçlanmıştır. Operasyon, tek bir İHA üzerine takılı RF sinyal gücünü ölçebilen bir sensör ile yapılabilmektedir. Alınan sinyal gücünde karşılaşılan yüksek genlikli gürültü, lokalizasyon probleminin çözümünü zorlaştırmaktadır. Yapılan testlerdeki gürültü ölçüm sonuçları RF sinyalinin uzaklığa bağlı modelinin Friis denkleminde daha gerçekçi oluşturulmasını sağlamıştır. Bu model ile beraber parçacık filtresi çalışılmış ve simülasyon sonuçları ortaya konmuştur. Yapılan simülasyon sonucunda, 25 m/sn hızla uçan İHA'nın -60 dBm hassasiyetli alıcısı ile 1 W çıkış güçlü kaynaktan yayılan sinyali almaya başlamasından itibaren 91.89 saniye içerisinde 14.23 metre hata ile hedefi lokalize etmiştir.

GİRİŞ

İnsansız hava araçlarının (İHA) her geçen gün popülerliğinin artması, İHA'ların kullanıldığı sivil ve askeri alanların da genişlemesini sağlamaktadır. Bu da İHA'lar üzerine yapılan teknolojik gelişmelerin devamlılığına ve artışına izin vermektedir. İHA kullanım alanlarından biri de konumu bilinmeyen RF sinyal kaynağının bulunması ve takip edilmesi uygulamasıdır. Bu uygulama, sivil ve askeri amaçlara hizmet edebilmektedir.

Konumu bilinmeyen RF sinyal kaynağının bulunması problemi üzerine literatürde bir çok çalışma bulunmaktadır. RF kaynağının lokalizasyonu problemi, kaynak ile sensörün görüş çizgisinde olup olmaması (LOS – NLOS), lokalizasyonu için kullanılacak RF sinyal gücünü (RSS) ölçen sensörü ve RF sinyal yönü sensörü gibi bir çok parametre için ele alınabilmektedir. Görüş çizgisinde olmayan durumlar için RF sinyal kaynağının İHA'lar ile bulunmasına dair bir çözüm 2014'te sunulmuştur [Deghan, 2014]. RF sinyal kaynağının, optimize edilmiş rota sayesinde lokalizasyonunun sağlanması algoritması ise bir sene önce Bamberger'in önerisi olarak literatürde yer bulur [Bamberger, 2013]. Konveks olmayan ortamda, robot takımıyla kestirim ve kontrol algoritmalarıyla, RF sinyalinin lokalizasyonu sistemi yine 2014'te önerilmiştir [Charrow, 2014]. Daha geriye gidildiğinde lokalizasyon sırasında, haberleşme kısıtlarının oluşturacağı problemi çözebilmek için maksimum veriyi almayı sağlayacak rota planlaması ile haberleşme kopmalarının önlenmesi sağlanmıştır [Stachura, 2011]. Hareketli RF kaynağının, İHA takımı için tasarlanmış kontrol mimarisi ile lokalizasyonu Pack ve York tarafından 2005'te önerilmiştir [Pack, 2005]. 2007'de alınan sinyal gücüne bağlı olarak, Bayesian filter ile olasılıksal dağılımının hesaplanması

¹ Doktora Öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: abduallahmeh@itu.edu.tr

² Yüksek Lisans Öğrencisi, Uçak ve Uzay Müh. Böl., E-posta: herekoglu16@itu.edu.tr

³ Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: yenicerir@itu.edu.tr

⁴ Dr. Öğr. Üyesi, Uçak Müh. Böl., E-posta: emre.koyuncu@itu.edu.tr

⁵ Prof. Dr., Uçak Müh. Böl., E-posta: inalhan@itu.edu.tr

ve lokalizasyonu çözümü sunulmuştur [Scerri, 2007]. RF sinyalinin geliş açısı sensörü ile tasarlanan Kalman filtresi ile lokalizasyonu da bir diğer çözüm olarak mevcuttur [Delima, 2006; Toussaint, 2007]. Multikopter sistemi için tasarlanan yalpalama kontrolcüsü ile, üzerine takılan yönlü anten sayesinde, RF sinyalinin geliş açısının hesaplanması ve lokalizasyonu 2014'te Isaacs ve diğerleri tarafından sağlanmıştır [Isaacs, 2014]. Hareketli RF kaynağının lokalizasyonu için kullanılacak Genişletilmiş Kalman Filtresi (EKF) ile Kokusuz Kalman Filtresi (UKF) karşılaştırılması yapılmıştır [Effati, 2017]. Zigbee protokolü ile çalışan haberleşme modülleri, geliş açısı ve sinyal gücü hesabına bakarak lokalizasyon ve haritalama yapma amacıyla da kullanılmıştır [Hevrdejs, 2017].

Önceki yaptığımız çalışmada, RF sinyali alındığında ölçülen sinyal gücüne bağlı olarak konumunun kestirimi algoritması sunulmuştur [Hasanzade, 2017]. Yapılan çalışma, 10 km x 10 km alanda uygulanması planlandığından, öncelikle üç adet İHA alanı tarayarak sinyal almaya çalışırlar. Daha sonra İHA'lardan birinin sinyal almasıyla birlikte diğer İHA'ların, sinyalin alındığı bölgeye intikal etmesi beklenir. Üç İHA da sinyal alamaya başladıktan sonra konumunun kestirimi için tasarlanan Genişletilmiş Kalman Filtresi ile lokalizasyon sağlanır.

Bu çalışmada, aynı sinyal gücünü ölçen sensör kullanılarak, Parçacık Filtresi (PF) ile RF kaynağının lokalizasyonu çalışması sunulmuştur. Bir önceki çalışmamız [Hasanzade, 2017] ile karşılaştırıldığında, EKF kullanıldığı zaman en az üç İHA'nın RF sinyal menzilininde olması gerekmektedir. Fakat burada önerilen PF ile sadece bir İHA'nın menzil içerisinde olması yeterlidir. Bu özellik, EKF'de tüm araçların menzil içerisinde girmesi gerektiği için harcanan zamandan kazanç sağlamış, hem de maliyet açısından daha ucuz bir çözüme izin vermiştir. Bu çalışmada 5km x 5km'lik bir alanda simulasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ancak, önerilen PF sadece İHA'nın sinyal menziline girmesinden sonra test edilebileceği için, yapılan simülasyon çalışmaları, İHA'nın RF sinyal menziline girmesinden sonra raslantısal konumlardan girdiği andan itibaren, PF'nin performansı ve İHA'nın yönlendirilmesini içermektedir. Yapılan simülasyonlar sonucu önerilen PF yöntemi, ilk sinyal alındıktan sonra 91.89 saniye içerisinde, 14.23 metre hata ile kaynağı bulmuştur.

Bildirinin geri kalanında; 2. bölümde problem koşulları ve sistem mimarisi, 3. bölümde RF yayılım modelinin detayları, 4. bölümde de parçacık filtresi ve simülasyonu anlatılmıştır. Son olarak 5. bölümde sonuçlar, görüşler ve gelecek çalışmalara dair bilgiler verilmiştir.

PROBLEM KOŞULLARI VE SİSTEM MİMARİSİ

Problem Koşulları

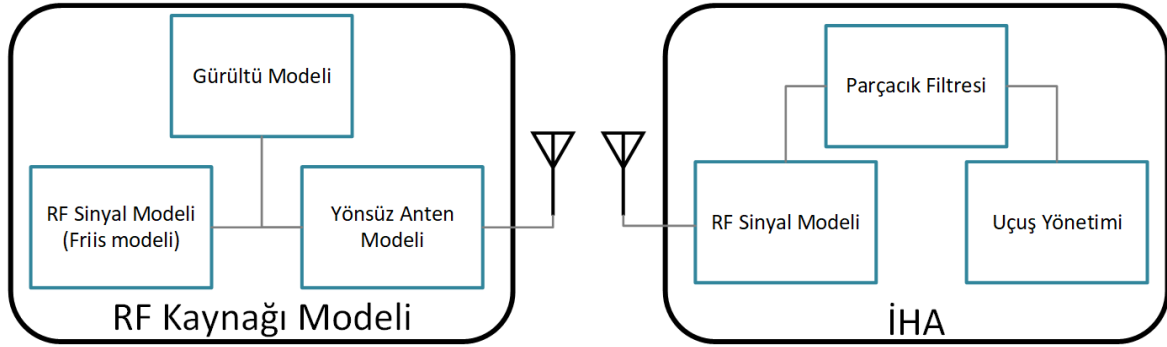
RF kaynağının lokalizasyonu problemi, belirli varsayımlar dahilinde çözülmeye çalışılmıştır. Bu varsayımlar:

- Başlangıçta, RF kaynağının konumu bilinmemektedir.
- RF kaynağının 2 boyutlu bir düzlemde olduğu kabul edilmiştir. Yükseklik farkı, yapılan çalışmalara dahil edilmemiştir.
- RF kaynağı, sabit ve bilinen bir güçte sinyal göndermektedir.
- Önerilen lokalizasyon çözümünde, sadece RF sinyalinin gücünü ölçen sensör kullanılmıştır.
- İHA'nın konumu, GPS aracılığıyla elde edilmektedir.
- RF kaynağı ile İHA'nın her zaman görüş çizgisinde olduğu varsayılmıştır.
- RF kaynağı sürekli olarak sinyal göndermemektedir. Sinyal yayını periyodik olarak açılıp kapatılmaktadır. Bu problemi gerçekçi kılmak için önerilmiştir.
- İHA ve RF kaynağında yönsüz anten kullanıldığı varsayılmıştır.
- İHA'nın sabit bir yükseklikte uçtuğu ve bu yüksekliğin ± 5 metre değişebileceği kabul edilmiştir. Bu değişim, GPS'in hatası olarak dahil edilmiştir.

Sistem Mimarisi

Bu çalışmada önerilen sistem mimarisi Şekil 1'de gösterilmiştir. İHA'nın alacağı RF sinyali, önceden belirlenmiş frekans ve verici gücüne göre hesaplanmaktadır. Simulasyonda alınan sinyal gücünün gerçekçi olabilmesi için de İHA ile yapılan, test uçuşlarına dayalı ölçüm değerlerine

bağlı kalınarak sinyal kaynağı ve iletim kanalı modellenmiştir. Bu modele bağlı olarak da Gaussian beyaz gürültü genliği ve dağılımı belirlenmiş ve üretilen sinyale eklenmiştir. Ek olarak da iki tarafta da kullanılan yönsüz antenlerin, birbirleri arasında yaptığı rakım açısına bağlı olan anten kazancı değeri hesaplanmış ve antenin gerçek testlerde yaptığı etki, simülasyon ortamına da eklenmiştir. İHA tarafından ölçülen sinyal gücünden, Friis iletim denklemi ile uzaklık değeri elde edilir ve bu değer tasarlanan PF'ye giriş olarak verilir. PF de her bir döngü, sonucunu İHA'ya yeni rota olarak verir ve RF kaynağın lokalizasyonu sağlanır.



Şekil 1: Önerilen sistem şeması.

RF YAYILIM MODELİ

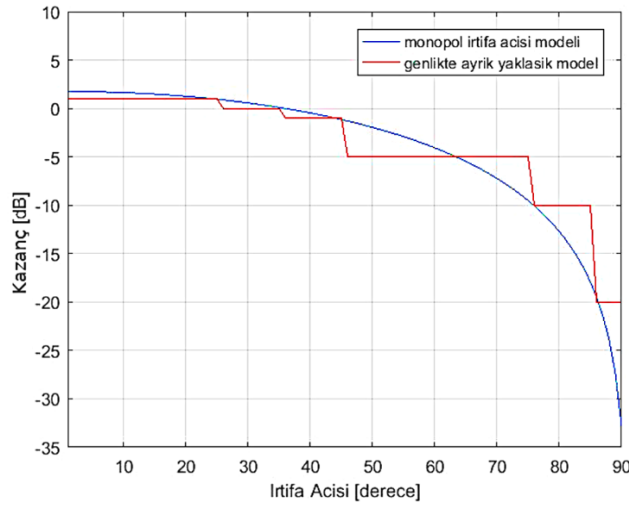
Parçacık filtresinde ölçüm değeri olarak kullanılabilmesi için alınan sinyal gücünün öncelikle uzaklık değerine dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu amaçla serbest uzay yayılım modelini temel alan Friis iletim Denklemi kullanılmıştır [Rappaport, 1996].

$$d = \sqrt{\left(\frac{P_t G_t G_r \lambda^2}{4\pi^2 P_r}\right)}$$

Denklemden, d alıcı ile verici arasındaki metre cinsinden uzaklık, P_t Watt cinsinden verici gücü, P_r Watt cinsinden alıcı gücü, λ metre cinsinden dalga boyu, G_t verici anten kazancı ve G_r alıcı anten kazancıdır. Serbest uzay modeli yansımaz ortam ve çevresel etkenlerin RF sinyali üzerine etkisinin olmadığı varsayımları üzerinden yola çıktığı için bu ve diğer etkenler modele yüksek genlikli toplamsal beyaz Gaussian gürültü olarak eklenmiştir.

$$RSSI_n = RSSI_{Friis} + \mathcal{N}(0, R)$$

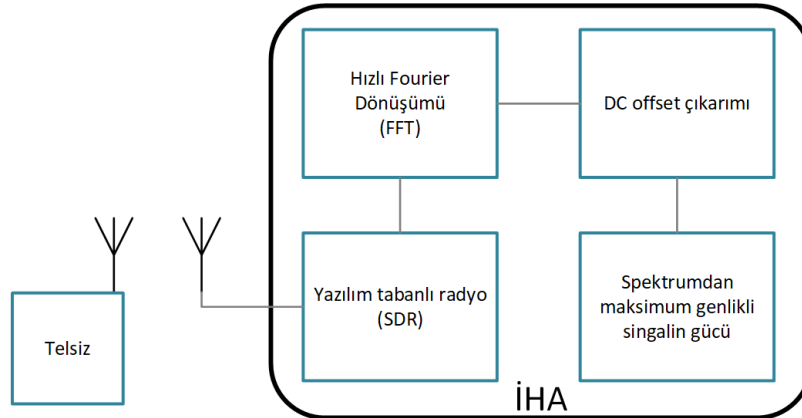
Alınan RSS değerinin daha gerçekçi olması için anten modeli eklenmiştir. RF kaynağı üzerinde ve İHA üzerinde yönsüz monopul Whip anten kullanılmaktadır. Kullanılan yönsüz antenlerin, değişen rakım açısına göre anten kazancı değişmektedir. Bu değişim de uzaklığa bağlı olarak alınabilecek RSS değerini değiştirmektedir. Bu etkinin de sisteme dahil edilebilmesi için anten modeli MATLAB Antenna Toolbox üzerinden hazırlanmış ve eklenmiştir. Anten kazancının rakım açısına göre olan değişimi Şekil 2'de sunulmuştur. İlave olarak, antene dair açı-kazanç ilişkisi ayrılaştırılarak tablolar biçiminde hesaplamalarda kullanılabilir hale getirilmiştir.



Şekil 2: Yönsüz Anten Modeli

RF ÖLÇÜM TESTLERİ

Simülasyon ortamında gerçekçi bir şekilde RF sinyalinin modellenmesi için uçuş testleri yapılmıştır. Bu ölçümleri gerçekleştirebilmek için RF kaynağı olarak UHF bandında çalışan FM/AM el telsizi kullanılmıştır. Bu sinyalin İHA üzerinde ölçümleri gerçekleştirebilmek için yazılım tabanlı telsiz olan RTL-SDR RTL2832U modülü kullanılmıştır. Bu modül üzerinde de yönsüz anten bulunmaktadır. Modül içerisinde Rafael Micro R820T çipi bulunmakta olup, 24 MHz ile 1766 MHz aralığındaki tüm sinyalleri okuyabilmektedir. Yapılan testlerde kullanılan sistemin şeması Şekil 3 görselinde verilmiştir.



Şekil 3: RF ölçüm testleri sistem şeması.

Testler için Seagull Decathlon 46 adlı model İHA platformu kullanılmıştır. Yapılan testlerden kullanılan RF kaynak ve ölçüm modülüne bağlı olarak 1261 metre menzili olduğu görülmüştür. Buna bağlı olarak bir çok test yaparak mümkün olan tüm uzaklıklarda modelleme yapılabilecek kadar ölçüm yapılmıştır. Bu alınan ölçümler, İHA içerisinde bulunan bilgisayar aracılığıyla kaydedilmiştir. Bu değerlerin analiz edilmesiyle de RF sinyalinin gerçek uçuşlardaki uzaklığa bağlı gürültü değişimi incelenmiş ve simülasyon ortamına da eklenmiştir.

PARÇACIK FİLTRESİ VE SİMÜLASYONU

İHA, alabildiği ilk sinyal örneğinin gücü ile parçacık filtrenin [Thrun, 2009] [Xiao, 2017] çalışmasını başlatır. Filtre çalışmaya başladığı zaman, ilk parçacıklarını belirlenen bölgeye tekdüze dağılıma bağlı olarak dağıtır. Bölge (Şekil 4), İHA'nın hareket yönüne doğru olan, büyüklüğü de RF sinyal menziline daha büyük olan bir alan olarak belirlenmiştir. İHA'nın geçtiği rota üzerinde hiç sinyal almadığı için, arkasında kalan bölgede RF sinyal kaynağının bulunamayacağından, karşısındaki bölgeye parçacıklar dağıtılır ve parçacık filtresi çalışmaya başlar.

$$w_0^{[n]} = \frac{1}{N_p}, n = 1, 2, \dots, N_p$$

Parçacık sayısı N_p olarak belirtilmiş olup, tüm parçacıklar $1/N_p$ değeri ile başlangıç ağırlıkları (w_t) verilir. Tekdüze dağılımla dağıtılan tüm parçacıklar başlangıçta aynı ağırlığa sahiptirler. Yapılan simülasyonlarda 3000 adet parçacık kullanılmıştır.

RF sinyal kaynağının hareketine göre, parçacıklar bu harekete bağlı olarak örneklenmektedir.

Örnekleme için, $q(x_t^{[n]} | x_{t-1}^{[n]}, u_t)$ dağılımı kullanılmaktadır. Burada u_t kontrol girişini (hareketi) belirtmektedir. Problemimizde RF sinyal kaynağı hareketsiz olduğundan $u_t = \mathbf{0}$ olarak alınmıştır.

Parçacıklar, RF sinyal kaynağının hareketine göre sıradaki tahmin yapıldıktan sonra, alınan ölçüm değerine bağlı olarak tekrar ağırlıklandırılır.

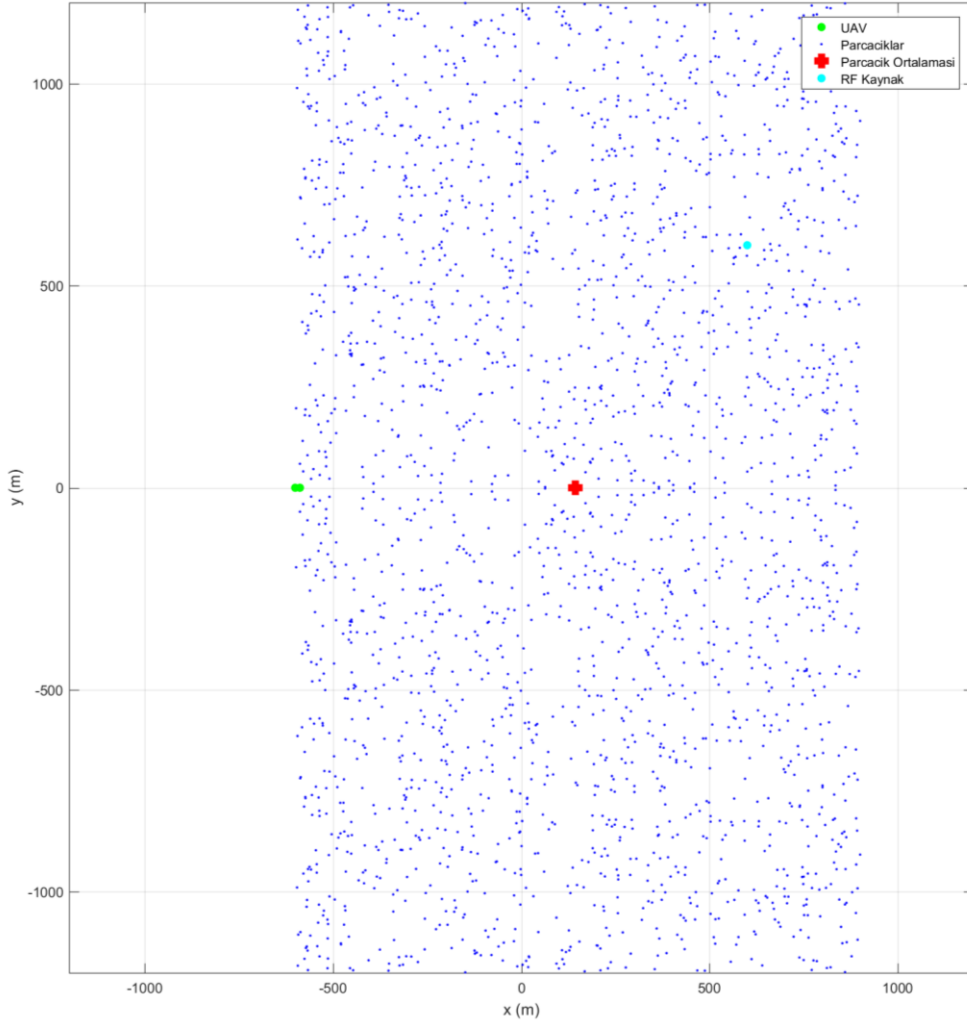
$$w_t^{[n]} \sim w_{t-1}^{[n]} \frac{p(z_t | x_t^{[n]}) p(x_t^{[n]} | x_{t-1}^{[n]})}{q(x_t^{[n]} | x_{t-1}^{[n]}, z_t)}$$

Bu denklemde z_t , o andaki ölçüm değeri olarak verilmiştir. Alınan ölçümlere göre, RF sinyal kaynağının parçacıkların konumunda bulunma olasılıkları, parçacıkların yeni ağırlıkları olarak atanmıştır. Yapılan testlerde tüm uzaklıklar metre cinsinden yapıldığından, ölçülen RF sinyal gücü de karşılık gelen de metreye çevrilmiştir. Bu dönüşüm için serbest uzak modeli kullanılmıştır. Sinyal gücü ile uzaklık arasındaki doğrusal olmayan bağlantı sebebi ile uzaklık ile alınan sinyal gücü üzerindeki gürültünün standart sapması arasında da doğrusal olmayan bir bağlantı bulunmaktadır. Bu nedenle bu standart sapma değeri sabit bir değer seçilmeyip, uzaklığın bir katı olarak belirlenmiştir. Ağırlıklandırma sonucu elenen parçacıklar yerine, ağırlığı olan parçacıklar arasından, tekdüze dağılım ile parçacıklar seçilir ve bu parçacıklarla aynı konumda olacak şekilde tekrar parçacık üretilir.

$$X_t = \frac{1}{N_p} \sum_{n=1}^{N_p} x_t$$

Her iterasyon sonunda parçacıkların ortalama değeri hesaplanır (X_t) ve bu değer İHA'nın ulaşmaya çalışacağı geçici hedef olarak girilir.

İHA'ya yeni hedef koordinatı verilmesi, belirli bir gecikme ile yapılmaktadır. Bunun nedeni, parçacıklar geniş bir alana saçıldığında İHA'nın yöneldiği bölgede sadece birkaç ölçüm yapıp bunların değeri üzerinden karar vermesini engellemektir. İHA'nın ölçüm aldığı yerlerin birbirleri arasındaki uzaklığın artması, gürültünün etkisinin minimize edilmesini ve daha çabuk yakınsamasını sağlamaktadır. Bu nedenle geciktirilmiş güncel rota ile, İHA daha fazla ölçüm alabildiği için, daha hızlı ve doğru sonuçlar alınabilmektedir.



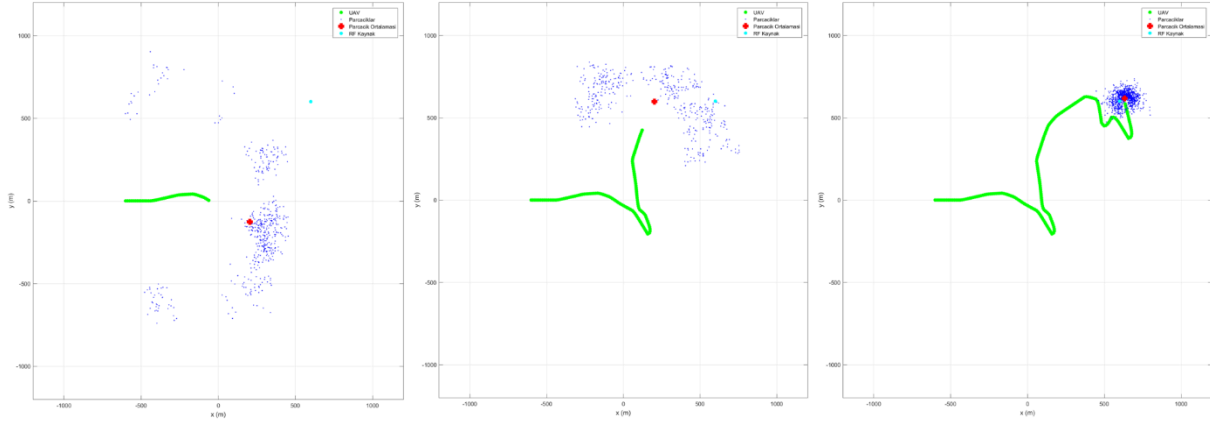
Şekil 4: Parçacık filtresi başlangıcı: parçacıkların tekdüze dağılıma göre rastgele örneklenmesi gösterilmiştir.

RF sinyalinde gözlemlenen gürültünün, uzaklık değeri bulunurken oluşturacağı etkisini parçacık filtresine ekleyebilmek için, ağırlıklandırma için kullanılan standart sapma, uzaklığın bir katı olarak kullanılmış ve adaptif hale getirilmiştir. Bunun nedeni de gürültünün uzaklık değişimine etkisinin, yine uzaklığın bir fonksiyonu olarak modellenmesidir. Bu etkinin doğru değerlendirilebilmesi için her iterasyonda güncellenmesi gerekmektedir.

Parçacık filtresinde 3000 adet parçacık kullanılmıştır. İHA, parçacık filtresi sonucu parçacıkların ortalama değerlerini takip etmeye çalışır (Şekil 5). Belirlenen yeni rota, τ_b kadar gecikme değeri ile güncellenmektedir.

$$\tau_b = (-2P_{rdb}/10) * dt$$

P_{rdb} , dBm cinsinden alınan sinyal gücünü, dt de iterasyonun aldığı zamanı belirtmektedir. Yapılan simülasyonda da her iterasyon 0.2 s sürmektedir.



Şekil 5: Parçacık filtresi sonucu İHA'nın RF sinyal kaynağını bulma senaryosu.

SONUÇ

Alınan sinyal gücüne bağlı olarak çıkış gücü bilinen fakat konumu bilinmeyen sinyal kaynağının lokalizasyonu problemine çözüm olarak yeni bir sistem önerilmiştir. Sistem içerisinde parçacık filtresi kullanılmış olup, RF sinyal modellenmesi serbest uzay modeline göre gerçekleştirilmiş ve sonuçlar simülasyonda test edilip gösterilmiştir. Monte Carlo simülasyonu ile de desteklenmiş ve sistem başarımı ortalama 91.89 saniyede, 14.23 metre hata ile tespit olarak bulunmuştur.

İlerleyen çalışmalarda, simülasyondaki otopilot sisteminin yazılımsal (software in the loop, SITL) benzetim ortamının hazırlanması ve sabit kanatlı İHA modelinin daha gerçekçi hale getirilmesi ile önerilen yöntemin başarımı tespit edilecektir. Yapılan testler sonucuna bağlı olarak uygun uçaklar ve aviyonikler hazırlanıp, gerçek testlerin yapılması planlanmaktadır.

Kaynaklar

Bamberger, R. J., Moore, J. G., Goonasekera, R. P., and Scheidt, D. H., 2013. "Autonomous Geolocation of RF Emitters Using Small, Unmanned Platforms", Johns Hopkins Apl Technical Digest Vol. 32, No. 3, pp. 636-646, December.

Charrow, B., Michael, N., and Kumar, V., 2014. "Cooperative multi-robot estimation and control for radio source localization", the International Journal of Robotics Research(IJRR) Vol. 33, No. 4, pp. 569-580.

Dehghan, S. M. M. and Moradi, H., 2014. "A new approach for Simultaneous Localization of UAV and RF Sources (SLUS)," 2014 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), Orlando, FL, pp. 744-749.

DeLima, P., York, G. and Pack, D., 2006. "Localization of ground targets using a flying sensor network," IEEE International Conference on Sensor Networks, Ubiquitous, and Trustworthy Computing (SUTC'06), Taichung.

Effati, M., and Skonieczny, K., 2017. EKF and UKF localization of a moving RF ground target using a flying vehicle. In Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2017 IEEE 30th Canadian Conference on (pp. 1-4).

Hasanzade, M., Herekoglul, O., Ure, N. K., Koyuncu, E., Yeniçeri, R., and İnalhan, G, 2017. Localization and tracking of RF emitting targets with multiple unmanned aerial vehicles in large scale environments with uncertain transmitter power. In Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2017 International Conference on (pp. 1058-1065).

- Hevrdejs, K., Knoll, J., and Miah, S, 2017. A ZigBee-based framework for approximating sensor range and bearing. In *Electrical and Computer Engineering (CCECE), 2017 IEEE 30th Canadian Conference on* (pp. 1-4).
- Isaacs, J. T., Quitin, F., Carrillo, L. R. G., Madhow, U., and Hespanha, J. P, 2014. Quadrotor control for RF source localization and tracking. In *Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 2014 International Conference on* (pp. 244-252).
- Pack, D. J., and York, G. W. P., 2005. "Developing a Control Architecture for Multiple Unmanned Aerial Vehicles to Search and Localize RF Time-Varying Mobile Targets: Part I," 2005 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Barcelona, Spain, April, pp. 3954-3959.
- Rappaport, T. S., 1996. *Wireless communications: Principles and Practice*. Prentice Hall New Jersey.
- Scerri, P., Glinton, R., Owens, S., Scerri, D. and Sycara, K., 2007. "Geolocation of RF Emitters by Many UAVs", AIAA Infotech@Aerospace 2007 Conference and Exhibit, Infotech@Aerospace Conferences, Rohnert Park, CA, May.
- Stachura, M., and Frew, E. W., 2011. "Cooperative Target Localization with a Communication-Aware Unmanned Aircraft System", *Journal of Guidance, Control, and Dynamics*, Vol. 34, No. 5, pp. 1352-1362, September-October.
- Thrun, S., Burgard, W., and Fox, D., 2009. *Probabilistic robotics*. Cambridge, Massachusetts: MIT Press.
- Toussaint, G. J., De Lima, P. and Pack, D. J., 2007. "Localizing RF Targets with Cooperative Unmanned Aerial Vehicles," 2007 American Control Conference, New York, NY, pp. 5928-5933.
- Xiao, Y., Ou, Y. and Feng, W., 2017. "Localization of indoor robot based on particle filter with EKF proposal distribution," 2017 IEEE International Conference on Cybernetics and Intelligent Systems (CIS) and IEEE Conference on Robotics, Automation and Mechatronics (RAM), Ningbo, pp. 568-571.