

# 2.4 GHz FMCW MIT Teneke Radarıyla Hedef ve Menzil Tespiti Target Detection and Ranging with the 2.4 GHz MIT Coffee Can Radar

Sevgi Zübeyde Gürbüz, Mustafa Buğra Özcan, Ali Burak Parım, Seda Demirhan, Zeki Hayran, Melis Cansu Karaduman, Mehmet Saygın Seyfioğlu, Bürkan Tekeli, Bahri Çağlıyan  
TOBB University of Economics and Technology, Dept. of Electrical and Electronics Eng., Ankara, Turkey  
İletişim: szgurbuz@etu.edu.tr

**Özetçe**—Lisans öğrencilerinin radara karşı ilgilerini artırmak amacıyla TOBB ETÜ Radar Sistemleri Laboratuvarında 2nci ve 3ncü sınıf öğrencileriyle 2.4 GHz FMCW MIT Teneke Radarı hem delikli tahta üzerine hem de baskı devre (PCB) olarak gerçekleştirilip hedef ve menzil tespiti için kullanılmıştır. Kurulum hatalarını ayıklamak ve devrenin doğru işleyişini göstermek için alıcı ve verici devreleri SPICE ile benzetimi yapılmıştır. Radar, dışarıda yürüyen insanların ve yoldan geçen araçların hızını ve menziline tespit etmek için başarıyla kullanılmıştır. Yavaş hedeflerin birbirinden ayrılabilirliğini değerlendirmek için yürüyen ve koşan insanların, hızı düşük araçların ve bisikletçilerin mikro-Doppler imzaları ölçülmüştür. Proje, öğrencilerin radar ve sinyal işleme bilgisini artırmakta oldukça başarılıydı. İleride RF devre seviyesine inilerek sistemin darbe doppler versiyonunun geliştirilmesi hedeflenmektedir.

**Anahtar Kelimeler** — FMCW, radar donanımı, eğitim.

**Abstract**—For the purpose of increasing the undergraduate student interest in and knowledge of radar, a 2.4 GHz FMCW MIT Coffee Can radar was built by 2<sup>nd</sup> and 3<sup>rd</sup> year undergraduates in the TOBB ETÜ Radar Systems Laboratory, and used for target detection and ranging. The radar was constructed both on a protoboard and on a printed circuit board (PCB). SPICE simulations were conducted to aid in debugging and demonstrate the proper functioning of the transmitter and receiver. The potential to discriminate slow-moving targets was assessed by measuring the micro-Doppler of walking and running people, low-speed vehicles, and bicyclists. The project was successful in increasing student interest in radar and signal processing. In the future, it is aimed to further develop the system at an RF circuit design level into a pulse Doppler radar.

**Keywords**—FMCW, radar hardware, education

## I. GİRİŞ

Türkiye’de radar sistemleri ve radar sinyal işleme genellikle lisansüstü düzeyinde öğretilmektedir. Bunun temel nedeni radar teknolojilerinin elektronik, elektromanyetik ve sinyal işleme gibi birçok anabilim dalında sağlam bir altyapı gerektirmesidir. Radar sistemlerini merak eden 4. sınıf öğrencileri lisansüstü radar derslerini almaya teşvik edince,

karşılaşılan yoğun matematiksel yaklaşım nedeniyle dönemin başında duyulan heyecan kaybolmaktadır. Bu durum radar üzerinde araştırma yapmak isteyen öğrenci sayısını olumsuz etkilemektedir. Hâlbuki Türk savunma sanayisinde doktora düzeyinde eğitilmiş radarcılara çok ihtiyaç duyulmaktadır.

Lisans öğrencilerinin radara karşı ilgilerini artırmanın önemli bir koşulu ise radar teknolojilerini *erişilebilir kılmaktır*. Öğrencilerin bilgisi en çok laboratuvar ortamında gerçek sistemlerle uğraştıklarında pekişir. Bu nedenle, günümüzde üniversitelerin gittikçe uygulamalı eğitime daha çok yer verdiklerini gözlemleyebiliriz. Radar alanında pratik eğitimi sağlayan bir “ev yapımı” radar 2011 yılında MIT Lincoln Laboratuvarı tarafından tasarlanmış [1] ve başarılı bir şekilde MIT’de üç haftalık bir kısa kurs [2] olarak gönüllü öğrencilere yaptırılmıştır. Lincoln Lab’ın tasarladığı radar 2.4 GHz olup anten olarak iki kahve tenekesini kullanmaktadır. Parçaların tamamı yaklaşık 700 TL maliyetli, çoğunlukla yurt dışında bulunan ve internet üzerinden satış yapan elektronik firmalarından temin edilebilmektedir.

Güz 2013 döneminde TOBB Ekonomi ve Teknoloji Üniversitesi Radar Sistemleri Laboratuvarında 3’er öğrenciden oluşan gruplarla iki adet MIT teneke radarı yapıldı. Öğrenci gruplarından biri sadece devre analizi dersini almış olan 2. sınıf öğrencilerden oluşturuldu, diğer grup ise devre ve sinyal işleme derslerin tamamını almış olan 3. sınıf öğrencilerden oluşturuldu. Önce, MIT’nin orijinal tasarımın kullandığı bütün parçalar yurt dışından tedarik edilerek teneke radarı yapıldı. Sonra, maliyeti düşürmek ve yurt dışı bağımlılığı asgariye indirmek için mümkün olduğunca yurt içinden tedarik edebileceğimiz parçalar araştırıldı. Kurulum aşamasında hataları ayıklamak ve seçilen parçaların uygunluğunu doğrulamak için sistem SPICE da simüle edildi. Sistemin dayanıklılığını artırmak için delikli tahta üzerine kurulmuş olan alıcı devreleri de kapsayan bir baskı devre tahtası (PCB) tasarlandı.

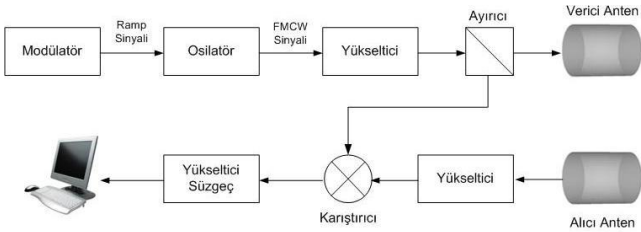
Şimdiye kadar bu radar ile yapılan çalışmalarda [3-5] sadece arabaların zamanla değişen menzili ve hızı tespit edilmiştir. Bu çalışmada ise menzil ve hız ölçümleri yanı sıra

çeşitli hedeflerin mikro-Doppler imzaları da ölçülmüştür. Örneğin, araçlar, yürüyen ve koşan insanlar ve bisikletçiler.

Bu bildiriye önce Teneke Radarının donanımsal yapısı, devre elemanlarının değer seçimi ve teneke anten tasarımının nasıl yapıldığı açıklanmıştır. Devrenin işleyişini kontrol etmek için yapılan SPICE benzetimlerinden ve tasarlanan baskı devre kartından da bahsedilmektedir. Sonra radar ile yapılan çeşitli deneylerin neticelerinden, hız, menzil ve mikro-doppler ölçüm sonuçlarımız verilmektedir. Son bölümde ise sistemi geliştirmek için planlanan çalışmalardan bahsedilmektedir.

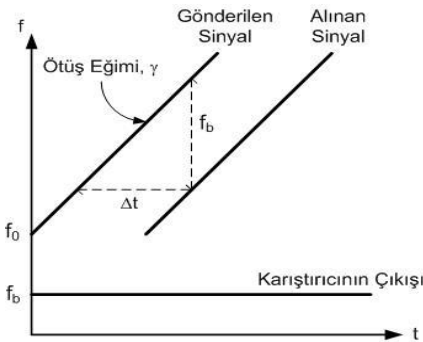
## II. MIT TENEKE RADARI

MIT Teneke Radarı merkez frekansı 2.4 GHz, doğrusal frekans kiplenmeli, sürekli dalga (linear Frequency Modulated Continuous Wave: FMCW) radarıdır. Biri alıcı ve biri verici olmak üzere radarın tenekelerden yapılmış iki tane anteni bulunmaktadır. Radarın üst seviye blok şeması Şekil 1'de gösterilmektedir. Önce modülatör aşamasında bulunan fonksiyon üretici çipiyle bir doğrusal ramp sinyal oluşturulmaktadır. Daha sonra bu ramp sinyali osilatöre verilerek FMCW sinyal üretilmektedir. FMCW sinyali bir yükseltici aşamasından geçtikten sonra teneke antenine verilir yayılmaktadır.



Şekil 1. Teneke radarın blok şeması.

Gönderilen sinyal olası hedeflerden yansıyor bir zaman gecikmesiyle alıcı antenle alınmaktadır. Alınan sinyal, gönderilen sinyalin zamanda geciktirilmiş ve frekansta kaydırılmış kopyasıdır. Zaman gecikmesinden menzil, frekans değişiminden de hız hesaplanabilmektedir. FMCW radarlarda zaman gecikmesi gönderilen ile alınan sinyallerin anlık frekans farkıyla ( $f_b$ ) ilişkilidir (Şekil 2):  $\Delta t = \gamma f_b$ . Dolayısıyla, hedefin menzili  $R = c\Delta t/2 = c\gamma f_b/2$ 'dir. Karıştırıcının çıkışı ise frekansı bu farkla eşit olan bir sinüsoidal sinyaldir. Sinyal bir yükseltici ve süzgeç devresinden geçtikten sonra bilgisayara işlenmek üzere aktarılmaktadır.



Şekil 2. FMCW alıcı devrenin frekans üzerindeki etkisi.

### A. Parça Temini ve Muadiller

Devreleri kurarken karşılaşılan ilk sorun birçok parçanın yurt içinde temin edilemiyor olmasıdır. Verici devrede kullanılan modülatör, osilatör, yükseltici ve ayırıcı devrelerin hepsi RF devreleri olup Türkiye'de herhangi bir muadil bulunamamaktadır. Bu nedenle RF bileşenler ancak doğrudan Amerika veya İngiltere'de bulunan üreticilerden satın alınarak tedarik edilebilmiştir. Alıcı devrede kullanılması önerilen MAX414 düşük gürültülü dörtlü op-amp dahi yurt içinden temin edilememektedir. Bu çalışmada maliyeti düşürmek için düşük gürültü özelliğe sahip olmayan LM324 op-amp kullanılmıştır. Bu değişiklik devrenin temel işleyişini etkilememekle beraber sadece çıkışta görülen elektronik gürültünün daha fazla olmasına sebep olmaktadır.

### B. Teneke Antenleri

Kullanılacak tenekelerinin dairesel dalgakılavuz anteni olarak işlev göreceğinden tenekelerin boyutlarının doğru seçilmesi önem arz etmektedir. TE11 modunu uyarmak için radarın arzu edilen frekansı en az antenin cutoff frekansı kadar yüksek olmalı [6]:

$$f_{\text{radar}} > f_{\text{cutoff}} = \frac{2c}{3.41D} \quad (1)$$

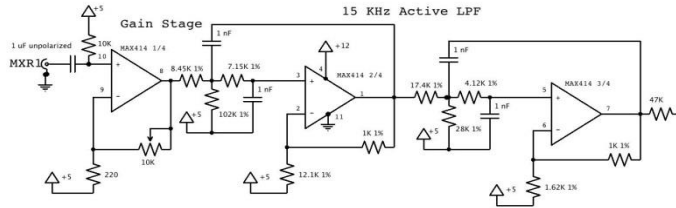
Burada c ışığın hızı ve D tenekenin çapıdır. 2.4 GHz frekansta çalışacak bir radar için cutoff frekansı en az 1.8 GHz olarak seçilirse, tenekelerin çapı en az 10 cm olmalı. Tenekenin uzunluğu ise en az dalgaboyu (18.5 cm) kadar büyük olmalıdır. Tenekenin bu alt sınırdan daha uzun seçilmesi durumunda ise sinyalin gücü artırılabilecektir.

Verilen bilgilere ek olarak sinyalin hangi noktadan verildiği de önemlidir. SMA kablonun ucu teneke tabanından 4.6 cm içeride verilmelidir. Kullanılan ucun orijinal hali çok kısa olduğundan, bu uca tercihen bakır bir teli lehimleyerek uç 3.1 cm'e kadar uzatılmalıdır. Aksi takdirde ucunun uzatılmaması antenin gücünü çok azaltacağından, radar en yakınından geçen nesnelere hareketine duyarsız kalır. Son olarak antenlerin arasında merkezden merkeze 20 cm mesafe olmalıdır. Bu mesafe antenlerin karşılıklı etkileşim seviyesinin -40 dB olmasını sağlamaktadır [1].

### C. Yükseltici Süzgecin Ayarlanması

Şekil 3'de gösterilen yükseltici süzgeç devresi iki op-amp içeren dördüncü derece bir süzgeç devresi ile eviren kuvvetlendirici devresinin seri bağlantısından oluşmaktadır. Devre şemasında çoğu direnç ile kapasitörün değerinin verilmiş olmasına karşın kuvvetlendirici devresinde bulunan potansiyometre değerinin doğru ayarlanması radarın doğru işleyebilmesi için büyük önem taşımaktadır. Süzgeç ile kuvvetlendiricinin arasında herhangi bir tampon devresinin bulunmamasından dolayı kuvvetlendiricinin kazançını ayarlamak için potansiyometre değeri değiştirilince süzgecin 3dB eşik frekansını etkilenmektedir. Bu frekans eşik çok düşük olması durumunda radarın ölçebildiği maksimum

menzil de düşer. Çok yüksek olması durumunda ise radar istenmeyen örtüşme



Şekil 3. Yükseltici süzgeç devresi [2].

etkilerine maruz kalabilir. Bu etkiler düşünülerek süzgecin eşik frekansının 15 kHz'a ayarlanması gerektiği belirtilmiştir. LTSPICE ile yükseltici süzgeç devresinin simülasyonu yapılarak eşik frekansının 15 kHz olması için gerekli potansiyometre değerin 2.18 kΩ olması gerektiği bulunmuştur.

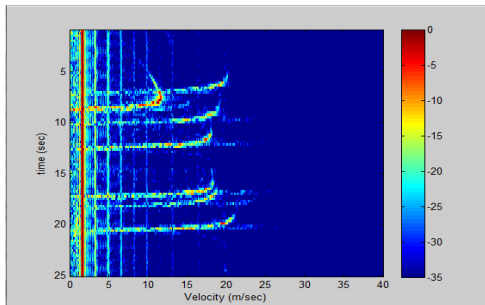
#### D. Pratik Mevzular

Radarin doğru çalışması için devre kurulurken dikkat edilmesi gereken bir kaç husus bulunmaktadır. Kolayca yapılabilecek hatalar ve bu hataların oluşturdukları olumsuz etkilerden kısaca bu bölümde bahsedilecektir.

**Topraklama.** Devrede açıkça belirtilen toprak bağlantıları yapılır; ancak karıştırıcının çıkışını devreye bağlayan coaxial kablunun da dış kısmının topraklanması unutulmamalıdır. Bunu yapmak için coaxial kablunun dış tabakasının bir kısmı soyulup ve bir tel lehilenerek toprağa bağlanabilir.

**CW Mod Ayarı.** Bir hedefin hızını tespit edebilmek için dopplerin ölçülmesi gerekmektedir. Ancak bu radar doppler ölçümlerini FMCW modunda değil CW modunda gerçekleştirmektedir. Radardan CW sinyali göndermek için osilatöre ramp sinyali değil sabit bir gerilimin sağlanması gerekmektedir. Bu esnada fonksiyon üretici çipin verdiği senkronizasyon çıkışı topraklanmazsa, Doppler ölçümlerinde parazit olarak dikey çizgiler görünmektedir (Şekil 4). Ölçüm esnasında fonksiyon üretici çipinin güç kaynağı kapatılırsa bu çizikler tamamiyle giderilmektedir.

**Menzil Ölçüm Hataları.** Eğer modülatörün çıkışında sağlanan ramp sinyalinin frekansı ile asgari ve azami genlik

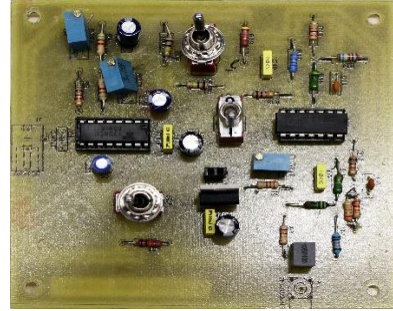


Şekil 4. Doppler ölçümünde yanlış bağlama sonucunda gözlemlenen dikey parazit çizgiler.

değerlerinin doğru ayarlanmaması, radarın ölçtüğü menzil değerlerinin hatalı olarak gözlenmesine neden olabilmektedir. Bu sapmalar, genliğin en büyük ve en küçük değerlerini, 5.0V ve 0.0V yapılarak giderilebilmektedir.

#### E. PCB Tasarımı

Kurulan sistemin daha kullanışlı ve dayanıklı kılabilmek için RF bileşenlerin haricindeki devreler Proteus yazılımıyla bir PCB şeklinde tasarlandı (Şekil 5).



Şekil 5. Teneke Radarı için hazırlanan PCB.

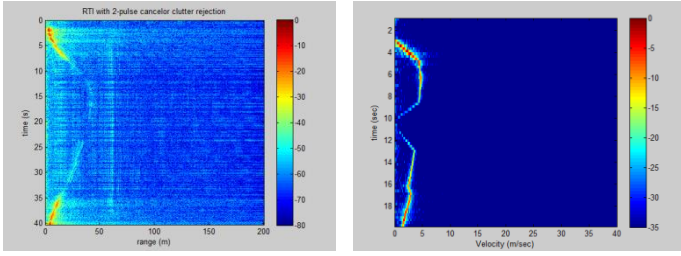
### III. HEDEF VE MENZİL TESPİDİ

Teneke radarı, çeşitli hedeflerin menzilin ve hızını ölçmek için kullanılmıştır. Menzil tespiti yaparken radar FMCW modunda olup frekans farkından yararlanılarak menzili hesaplamaktadır (Şekil 2). Daha sonra parazit yansımaları yok etmek için ölçümler 2-darbe yok edici filtreden (*two pulse cancellor*) geçirilmektedir. Hız ölçümünde ise sadece tek bir frekansta CW sinyali göndererek doppler etkisinden faydalanarak hız ölçümü yapılmaktadır.

Ölçümler hem bina içerisinde hem de dışarıda gerçekleştirilmiştir. Çok rüzgarlı havalarda teneke antenlerin sallanmasından dolayı radarın işleyişi olumsuz olarak etkilenmektedir. Test düzeneğinin görüntüsü Şekil 6'da gösterilmektedir. Bir aracın, yürüyen bir insanın ve bir bisikletli için alınan menzil ile doppler ölçümleri sırasıyla şekil 7,8 ve 9'da gösterilmektedir. Doppler ölçümlerinde hedeflerin radar kesitlerine göre alınan verilerin hedeflerden yansıyan sinyalin gücüyle ilintili olduğu görülebilmektedir. Bu verilere göre en güçlü yansıma sırasıyla araba, bisiklet ve yürüyen insandan alınmıştır. Bu şekilde alınan verilerin hangi hedefe ait olduğu hakkında bir fikir elde edilebilir.

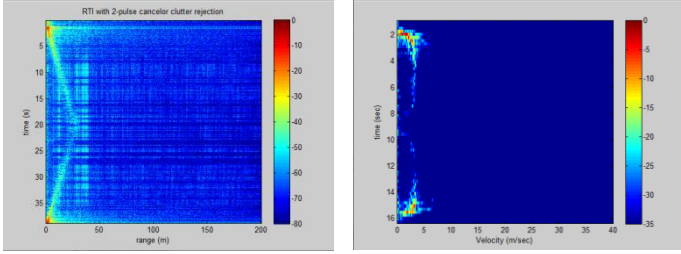


Şekil 6. Deney yapılırken Teneke Radarı.



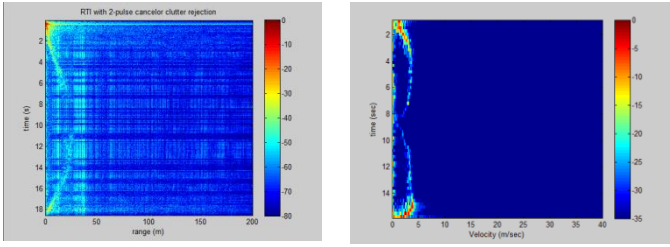
(a) (b)

Şekil 7. Bir araba için (a) menzil ve (b) doppler ölçümleri.



(a) (b)

Şekil 8. Bir yürüyen insan için (a) menzil ve (b) doppler ölçümleri.



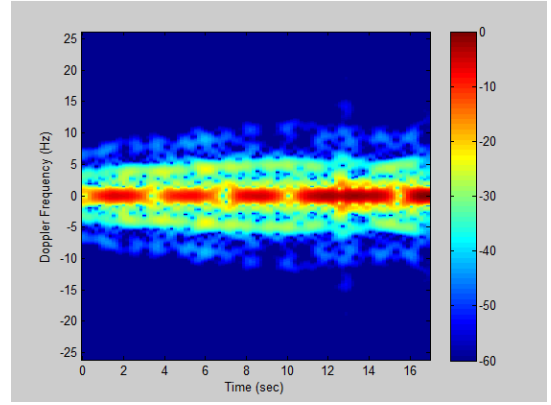
(a) (b)

Şekil 9. Bir bisikletli için (a) menzil ve (b) doppler ölçümleri.

Menzil ölçümünden mikro-Doppler, tüm menzillerin verilerinin toplanıp, kısa zaman Fourier dönüşümü alınarak elde edilmektedir. Deneylerimizde yürüyen, koşan ve bisiklete binen insanların mikro-Doppler imzaları ölçülmüştür. Ancak ölçümlerin arasında gözle görebilecek bir farklılık gözlemlenmemiştir. Koşan bir insan için Teneke Radar ile ölçülen mikro-Doppler imza Şekil 10'da gösterilmektedir.

#### IV. SONUÇ

2.4 GHz FMCW Teneke Radarı 2. ve 3. sınıf öğrencileri tarafından başarıyla yapılmış ve çeşitli hedeflerin menzilleri ile hızlarını ölçmek için kullanılmıştır. Ayrıca, yavaş hedeflerin mikro-Doppler imzaları menzil verilerinden çıkartılmış ve incelenmiştir. Proje kapsamında öğrencilerin donanım tasarlamak ve geliştirmek ile ilgili önemli bir tecrübe kazandıkları gözlemlenmiştir. Ayrıca, sinyal işleme kısmı da öğrenciler açısından önemli bir motivasyon kaynağı olmuştur. Radarı kurduktan sonra, “şimdi ne yapacağız,



Şekil 10. Koşan bir insanın Teneke Radarıyla ölçülmüş mikro-Doppler imzası.

hocam?” sorusunun önemli cevabı: sinyal işlemedir! Sinyal işlemenin gücü sensörlerle alınan verilerden bilgi çıkartabilmemizi sağlamasından kaynaklanmaktadır. Güz döneminde bu projeyi gerçekleştiren öğrenciler Bahar döneminde sinyal işleme dersini almaktadırlar ve yapmış oldukları radarın kabiliyetlerini geliştirmek için *sinyal işleme* dersini tamamlamayı beklemektedirler.

Gelecek çalışmalarımızda Teneke Radarın donanımı geliştirerek pulse Doppler modunun eklenmesi ve yurt dışından tedarik edilen RF bileşenlerin transistör seviyesinde tasarlanması hedeflenmektedir. Toplam dört Teneke Radarı kurup, bu radarların bir algılayıcı ağ çerçevesinde bina içi insan tespiti ve takibi için kullanılması da planlanmaktadır.

#### TEŞEKKÜR

Manevi desteğini esirgemeyen Rektörümüz Prof. Dr. Necip Çamuşcu'ya ve öğrencilerimizle yazışarak uzaktan yardım eden MIT Teneke Radarın tasarımcısı olan Dr. Gregory Charvat'a minnet borçluyuz.

#### KAYNAKÇA

- [1] Charvat, G. L. "The MIT IAP radar course: Build a small radar system capable of sensing range, Doppler, and synthetic aperture (SAR) imaging." *IEEE Radar Conference (RADAR)*, 7-11 May 2012.
- [2] MIT Open-Course Ware: <http://ocw.mit.edu/resources/res-ll-003-build-a-small-radar-system-capable-of-sensing-range-doppler-and-synthetic-aperture-radar-imaging-january-iap-2011/index.htm>
- [3] Dr. Gregory Charvat'ın Forumu: <http://glcharvat.com/tincan/>
- [4] MIT öğrencilerin sayfası: <http://web.mit.edu/kimt/www/radar/>
- [5] Michigan State Üniversitesi öğrencilerin web sayfası: <http://www.egr.msu.edu/classes/ece480/capstone/fall11/group07/file/Home.html>
- [6] Kraus, John D., Fleisch, Daniel A., *Electromagnetics with Applications*, McGraw-Hill, 1999.