

Kalman Filtresi

Levent Özbek



AKADEMİSYEN
KITABEVİ

© Copyright 2017

Bu kitabın, basım, yayın ve satış hakları Akademisyen Kitabevi A.Ş.'ne aittir. Anılan kuruluşun izni alınmadan kitabın tümü ya da bölümleri mekanik, elektronik, fotokopi, manyetik kayıt ve/veya başka yöntemlerle çoğaltılamaz, basılamaz, dağıtılamaz. Tablo, şekil ve grafikler izin alınmadan, ticari amaçlı kullanılamaz. Bu kitap T.C. Kültür Bakanlığı bandrolü ile satılmaktadır.

ISBN	Sayfa ve Kapak Tasarımı
978-605-9354-52-3	Akademisyen Dizgi Ünitesi
Kitap Adı	Yayıncı Sertifika No
Kalman Filtresi	47518
Yazar	Baskı ve Cilt
Levent ÖZBEK	Sonçağ Matbaacılık, ANKARA/ 2017
Yayın Koordinatörü	DOI
Yasin DİLMEN	10.37609/akya.342

GENEL DAĞITIM
Akademisyen Kitabevi A.Ş.

*Halk Sokak 5 / A
Yenişehir / Ankara
Tel: 0312 431 16 33
siparis@akademisyen.com*

www.akademisyen.com

İçindekiler

GİRİŞ	1
1. KESİKLİ-ZAMAN DURUM-UZAY MODELLERİ	7
1.1. Lineer Kesikli-Zaman Durum-Uzay Modeli	7
1.2. Bir Doğru Üzerindeki Bir Cismin Hareketinin İncelenmesi	11
1.3. Milli Gelir ile İlgili Durum-Uzay Modeli	13
1.4. ARMAX Modelleri için Durum-Uzay Modeli Gösterimi	14
1.5. Sonsal Dağılımın En Büyüklenmesi Ölçütüne Göre Kalman Filtresinin Elde Edilmesi	16
1.6. En Küçük Hata Kareleri Ortalaması Ölçütüne Göre Kalman Filtresinin Elde Edilmesi	21
1.7. Basit İstatistik Teknikleri ile Kalman Filtresinin Elde Edilmesi	25
2. KALMAN FİLTRESİ İÇİN ASİMTOTİK DAĞILIM TEORİSİ	29
2.1. Gözlemlenebilme, Kontrol Edilebilme ve Kalman Filtresinin Kararlılığı	29
2.2. Kalman Filtresi için Merkezi Limit Teoremi	31
2.3. Kalman Filtresi için Merkezi Limit Teoreminde Yakınsama Hızlarının Değerlendirilmesi	33
2.4. c Sabitinin Belirlenmesi	36
2.5. Model Geçerliliği için Hipotez Testi	39
2.6. Model Geçerliliğinin Test Edilmesi ile İlgili Simulasyon Çalışması	41
3. KENDİNİ UYARLAYAN (UYARLI) KALMAN FİLTRESİ	43
3.1. Uyarlı Kalman Filtresi ile İlgili Yapılan Çalışmalar	43
3.2. Unutma Faktörü ile Kalman Filtresinin Uyarlanması	45
3.3. Kovaryans Matrisinin Ağırlıklandırılması ile Kalman Filtresinin Uyarlanması	49
3.4. Gürültü Kovaryanslarının Belirlenmesi ile Kalman Filtresinin Uyarlanması	51
3.5. Lineer Olmayan Durum-Uzay Modeli ve İlerletilmiş Kalman Filtresi	54
3.6. Hareketli Bir Cisim için Kalman Filtresinin Diğer Uyarlı Filtreler ile Karşılaştırılması	57
4. SİSTEM BELİRLEME VE OTOMATİK KONTROL	63
4.1. Sistem Belirleme	66
4.2. Geri Beslemeli Kontrol	72
4.3. Simulasyon Çalışması	72
4.4. Bilgisayar Destekli Sıcaklık Kontrolü	79
Sonuç ve Tartışma	83
Kaynaklar	85

Önsöz

Lineer ve lineer olmayan kesikli zaman stokastik durum uzay modelleri, 1960'lı yıllarda uydu, güdümlü mermi, uzay araçları ve hareket yeteneği olan hedeflerin, konumunu izleme ve kontrol etme gibi uygulamalar için geliştirilmiştir. Ayrıca durum uzay modelleri, fiziksel ve iktisadi süreçlerin modellenmesinde pek çok uygulama alanına sahiptir. Durum uzay modelinde yer alan ve gözlenemeyen durum vektörünün tahmin edicisi Kalman Filtresi olarak bilinir. Bu kitap, Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nde tamamladığım doktora tezinden oluşmaktadır. Kalman Filtresi konusunda dilimizde yazılmış kaynak eksikliğini giderilmesi amacıyla kitaplaştırılmıştır.

Levent Özbek
Ankara

KAYNAKLAR

- Aliev, F. A. and Özbek, L. 1996.** Kalman Filtresi için Merkezi Limit Teoreminde Yakınsama Hızlarının Değerlendirilmesi. Araştırma Sempozyumu '96 Bildirileri, s., 182-185, Ankara.
- Aliev, F. A. and Özbek, L. 1997.** Evaluation of Convergence Rate in the Central Limit Theorem for the Kalman Filter. IEEE Trans. Auto.Control., Sunuldu.
- Alpbaz, M. 1993.** Proses Kontrol. A.Ü.F.F. Döner Sermaye İşletmesi Yayınları, No: 12.
- Alpbaz, M., Zeybek, Z., Özbek, L., Aliev, F. A. 1997.** A Fuzzy Model Based Control of Well Mixed Reactor with Cooling Jacket. Lecture Notes in Computer Science Theory and Applications. International Conference, 5th Fuzzy Days, Germany.
- Anderson, B. D. O. and Moore, J. B. 1979.** Optimal Filtering. Prentice Hall.
- Ansley, C. F. and Kohn, R. 1983.** Exact likelihood of vector autoregressive moving average process with missing or aggregated data. Biometrika, 70; 275-278.
- Aström, K. J. and Wittenmark, B. 1973.** On Self-tuning Regulators. Automatica, Vol.9; 185-199.
- Bar-Shalom, Y. and Li, X. 1993.** Estimation and Tracking Principles, Techniques and Software. Artech House.
- Beltran, N. D. R. 1995.** Autoregressive and adaptive estimation with an application to hurricane track prediction. Int.J.Control, Vol.26; 1791-1812.
- Busto, R., Wellstead, P. E., Zarrop, M. B. 1990.** Parameter transient tracking for recursive estimation. IEE Proceedings, Vol. 138; 68-74.
- Bryson, A. E. and Ho, Y. C. 1969.** Optimization, Estimation and Control. Ginn and Company.
- Canudas, C., Carrillo, J. 1990.** A Modified EW-RLS Algorithm for Systems with Bounded Disturbances. Automatica, Vol. 26; 599-606.
- Chen, G. 1993.** Approximate Kalman Filtering. World Scientific.
- Chen, M. J. and Norton, J. P. 1987.** Estimation technique for tracking rapid parameter changes. Int.J.Control, Vol. 45; 1387-1398.
- Chu, Y. T. and Wu, W. 1987.** Bounded-disturbance adaptive control with exponential and selective data weightings. Int.J.Control, Vol.45; 1399-1413.

- Chui, C. K. and Chen, G. 1991.** Kalman Filtering with Real-time Applications. Springer-Verlag.
- Chow, H. 1994.** Robust Estimation in Time Series: An Approximation to the Gaussian Kalman Filter. Commun. Statist. Theory Meth. Vol. 23; 3491-3505.
- Chow, G. C. 1975.** Analysis and Control of Dynamic Economic Systems. Hohn Wiley.
- Chow, Y. S. and Teicher, H. 1988.** Probability Theory. Springer-Verlag.
- Cipra, T. 1997.** Recursive Methods for Time Series. ISI '97. Bulletin of the International Statistical Institute, Proceedings Book 2, 455-456, İstanbul.
- Cipra, T. and Romera, R. 1997.** Kalman Filter with outliers and missing observations. TEST, 6; 379-395.
- Dasgupta, S. and Huang, Y. 1987.** Asymtotically Convergent Modified Recursive Least Squares with Data-Dependent Updating and Forgetting Factor for Systems with Bounded Noise. IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 33; 383-392.
- Davis, M. H. A. and Vinter, R. B. (1985).** Stochastic Modelling and Control. Chapman and Hall.
- Denizhan, Y. 1997.** Bilgisayar ve Beyin, Bilgisayarın Giriş ve Çıkış Kanalları, Nar Yayınları, s. 39-51.
- Değirmenci, M. 1994.** Genel Otomatik Kontrol Kavramları ve Sistemleri. Termodinamik, s., 53-57.
- Deyst, J. J. 1973.** Corrections to "Conditions for Asymtotic Stability of the Discrete Minimum Variance Linear Estimator". IEEE Trans. Aut. Cont., 18(5); 562-563.
- Diderrich, G.T. 1985.** The Kalman Filter From the Perspective of Goldberger-Theil estimators. The American Statistician, Vol.39; 193-198.
- Duncan, D. B. and Horn, S.D. 1972.** Linear Dynamic Recursive Estimation from the Viewpoint of Regression Analysis. JASA, Vol.67; 815-821.
- Ergün, G. ve İnal, C. 1996.** Aykırı Değerlerin Varlığında Kalman Filtresinin İncelenmesi. Araştırma Sempozyumu '96 Bildirileri, s., 110-114, Ankara.
- Fagin, S. L. 1964.** Recursive Linear Regression Theory, Optimal Filter Theory and Error Analysis Optimal System. IEEE Int. Conv.Rec., 12; 216-240.
- Fahrmeir, L. and Tutz, G. 1994.** Multivariate Statistical Modelling Based on Generalized Linear Models. Springer-Verlag.

- Fitzgerald, R. J. 1971.** Divergence of the Kalman Filter. *IEEE Trans. Auto.Control.*, Vol. AC-16; 736-747.
- Fortescue, T. R., Kershenbaum, L. S., Ydstie, B. E. 1981.** Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors. *Automatica*, Vol.17; 831-835.
- Gunnarsson, S. 1996.** On Covariance Modification and Regularization in Recursive Least Squares Identification. Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, Technical Report No: 1604.
- Gunnarsson, S. 1997.** Combining and Regularization in Recursive Least Squares Identification. Department of Electrical Engineering, Linköping University, Linköping, Sweden, Technical Report No: 1871.
- Gustafsson, F. 1992.** Estimation of Discrete Parameters in Linear Systems. Ph.D Thesis. Department of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden.
- Guttman, I. and Pena, D. 1985.** Comment on "Dynamic generalization linear models and Bayesian Forecasting". *JASA*, 74; 140-146.
- Guo, L. 1995.** Convergence and Logarithm Laws of Self-tuning Regulators. *Automatica*, Vol.31; 435-450.
- Goodwin, G. C. and Sin, K. S. 1985.** Adaptive Filtering Prediction and Control. Prentice Hall.
- Grillenzoni, C. 1994.** Optimal Recursive Estimation of Dynamic Models. *JASA*, Vol. 89; 777-787.
- Hagglund, T. 1983.** New estimation techniques for adaptive control. Ph.D. Thesis. Lund University, Lund, Sweden.
- Hajiyev, C. 1997.** Stopping Rules Formation and Faults Detection in Kalman Filter Application. *Su ve İstatistik Sempozyumu Bildirileri*, Ankara.
- Harvey, A. C., 1990.** Forecasting, structural time series models and the Kalman Filter. Academic Press.
- Hashemipoor, H. R., Roy, S., Laub, A. J. 1988.** Decentralized Structures for Parallel Kalman Filtering. *IEEE Trans. Auto.Control.*, Vol. 33.
- Isaksson, A. 1988.** On System Identification in one and two Dimensions with Signal Processing Applications. Ph.D Thesis, Dept.of Electrical Engineering, Linköping University, Sweden.
- Jazwinski, A. H. 1970.** Stochastic Processes and Filtering Theory. Academic Press.

- Janacek, G. and Swift, L. 1993.** Time series forecasting, simulation, applications. Ellis Horwood Limited.
- Kalman, R. E. 1960.** A new Approach to linear Filtering and Prediction Problems, Journal of Basic Engineering, Vol.82; 35-45.
- Kalman, R. E. and Bucy, R. S. 1961.** New Result in Linear Filtering and Prediction Theory. Journal of Basic Engineering, Vol. 83; 95-108.
- Kohn, R. and Ansley, C. F. 1983.** Fixed interval estimation in state space models when some of data are missing or aggregated. Biometrika, 70; 683-688.
- Kovacevic, B., Durovic, Z. Glavaski, S. 1992.** On Robust Kalman Filtering. Int. J. Control. Vol. 56; 547-562.
- Kreisselmeir, G. 1990.** Stabilized Least-Squares Type Adaptive Identifiers. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC-35; 306-310.
- Kulhavy, R. 1995.** A Kullback-Leibler Distance Approach to System Identification. Proceedings of the IFAC Symposium on Adaptive Systems in Control and Signal Processing, Budapest, pp. 55-66.
- Kulhavy, R., and Kraus, F. J. 1996.** On Duality of Regularized Exponential and Linear Forgetting. Automatica, Vol. 32; 1403-1415.
- Kulhavy, R. and Zarrop, M. B. 1993.** On a general concept of forgetting. International Journal of Control. Vol. 58; 905-924.
- Kumar, P. R. and Varaiya, P. 1986.** Stochastic Systems: Estimation, and Adaptive Control. P. Hall.
- Kurz, L. and Tsai, C. 1983.** An Adaptive Robustizing Approach to Kalman Filter. Automatica, Vol.19; 279-288.
- Lee, C. P. 1995.** Forecasting with Incomplete Data. Commun. Statist. Theory Meth. Vol. 24; 1255-1269.
- Leibundgut, B. G., Rault, A., Gendrau, F. 1983.** Application of Kalman Filtering to Demographic Models. IEEE Transactions on Automatic Control, Vol. AC- 25; 427-434.
- Likar, A. and Dobnikar, A. 1994.** On-line Correction of the Gain in Kalman Filtering. Automatica, Vol. 30; 729-730.
- Ljung, L. and Söderström, T. 1983.** Theory and Practice of Recursive Identification. The MIT press.

- Ljung, L. 1987.** System Identification: Theory for the User. Prentice Hall.
- Ljung, L. and Gunnarsson, S. 1990.** Adaptation and Tracking in System Identification- A Survey. Automatica, Vol. 26; 7-21.
- Lozano, L. 1983.** Convergence Analysis of Recursive Identification Algorithms with Forgetting Factor. Automatica, Vol.19; 95-97.
- Masreliez, C. J. and Martin, R. D. 1977.** Robust Bayesian Estimation for the Linear Model and Robustifying the Kalman Filter. IEEE Trans. Auto.Control., Vol. AC-22; 361-371.
- McClamroch, N. H. 1980.** State Models of Dynamic Systems. Springer-Verlag.
- Mehra, R. K. 1972.** Approachs to Adaptive Filtering. IEEE Trans. Auto.Control., Vol. AC-17; 693-698.
- Meinhold, R. J. and Singpurwalla, N. D. 1983.** Understanding the Kalman Filter. The American Statistician, Vol. 84; 479-486.
- Meinhold, R. J. and Singpurwalla, N. D. 1989.** Robustification of the Kalman Filter. JASA, Vol. 37; 123-127.
- Moghaddamhoo, A. R. and Kirlin, R. L. 1993.** Robust Adaptive Kalman Filtering. In Approximate Kalman Filtering, ed. G.Chen, World Scientific Publisher, 65-85.
- Morrison, D. F. 1976.** Multivariate Statistical Methods. McGraw-Hill.
- Oral, Ö.H. 1982.** Linear Systems Analysis. Lecture Notes. ODTÜ.
- Otter, P. W. and Tempelar, D. T. 1980.** Kalman and Box-Jenkins Estimators in a simulation study. Analysing Time Series, 203-216.
- Özdaş, N., Dinibüttin, T., Kuzucu, A. 1988.** Otomatik Kontrol, İ.T.Ü. Sayı. 1373.
- Özbek, L. 1993.** Kesikli-Zaman Durum-Uzay Modelleri ve İndirgemeli Tahmin. Yüksek lisans tezi (basılmamış). Ankara Üniversitesi, Ankara.
- Özbek, L. 1996.** Dinamik Modellerde Ardışık Tahmin, Geri Beslemeli Kontrol ve Kamu Kesimi Madencilik Sektörü Üzerine Bir Uygulama. Araştırma Sempozyumu '96 Bildirileri, s., 192-197, Ankara.
- Özbek, L. 1997.** A Study on Adaptive Kalman Filter. ISI'97, Bulletin of the International Statistical Institute, Proceedings Book 2, 299-300, İstanbul.
- Özbek, L. and Aliev, F. A. 1998.** Comments on "Adaptive Fading Kalman Filter with an Application". Automatica, Vol.34, No:12, Basımda.

- Özbek, L. ve Öztürk, F. 1993.** Kalman Filtresi ve Gayri Safi Milli Hasıla Üzerine Bir Uygulama. I.Ulusal Ekonometri ve İstatistik Sempozyumu, Sempozyum Bildiriler Kitabı, s. 99-105, İzmir.
- Özbek, L., Öztürk, F., Aliev, F. A. 1996.** Kalman Filtresinde Kayıpları Önlemek için bir Yöntem. TOK'96, Otomatik Kontrol Ulusal Toplantısı, İstanbul. Boğaziçi Üniversitesi Yayın No:588, s.31-37, İstanbul.
- Petrov, V.V. 1975.** Sums of Independent Random Variables. Springer-Verlag.
- Papoulis, A. 1965.** Probability, Random Variables and Stochastic Processes. McGraw Hill Book Company.
- Salgado, M. E., Goodwin, G. C., Middleton, R. H. 1988.** Modified least squares algorithm incorporating exponential resetting and forgetting. International Journal of Control. Vol. 47; 477-491.
- Rao, B. S. and Durrant, H. F. 1991.** Fully decentralized algorithm for multisensor Kalman Filtering. IEE Proceeding-D, Vol. 138; 413-420.
- Sarioğlu, K. 1991.** Otomatik Kontrol (I), İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fak. Yayınları.
- Sarioğlu, K. 1992.** Otomatik Kontrol (II), İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fak. Yayınları.
- Sanoff, S. P. and Wellstead, P. E. 1983.** Comments on "Implementation of Self-tuning Regulators with Variable Forgetting Factors". Automatica, Vol.19; 345-346.
- Schuler, H and Suzhen, Z. 1985.** Real-Time estimation of Chain Length distribution in Polymerization Reactor. Chemical Engineering Science. Vol. 40; 1981-1904.
- Smith, A. F. M. and West, M. 1983.** Monitoring Renal Transplants: An Application of Multiprocess Kalman Filter. Biometrics, 39; 867-878.
- Sin, K. S. and Goodwin, G. C. 1982.** Stochastic Adaptive Control Using a Modified Least Squares Algorithm. Automatica, Vol. 18; 315-321.
- Singh, M. G. and Titli, A. 1978.** Systems:Decomposition Optimization and Control. Pergamon Press.
- Shumway, R. H., Olsen, D. E., Levy, L. J. 1981.** Estimation and Tests of Hypotheses for the Initial Mean and Covariance in the Kalman Filter. Commun. Statist. Theor. Meth., Vol. 2(4); 501-524.
- Spall, J. C. and Wall, K. D. 1984.** Asymptotic Distribution Theory for the Kalman Filter State Estimator. Commun. Statist.Theor.Meth., Vol. 13(16); 1981-2003.

- Spall, J.C. 1985.** Validation of State-Space Models from a Single Realization of Non-Gaussian Measurements. *IEEE Trans. Auto.Control.*, Vol. AC-30; 1212-1214.
- Stoffer, D. S. and Wall, K. D. 1991.** Bootstrapping State-Space Models: Gaussian Maximum Likelihood Estimation and the Kalman Filter. *JASA*, Vol. 86; 1024-1033.
- Sorenson, H. W. and Alspach, D. L. 1971.** Recursive Bayesian Estimation Using Gaussian Sums. *Automatica*, Vol. 7; 465-479
- Sorenson, H. W. and Stubbered, A. R. 1970.** Theory and Application of Kalman Filtering, Linear Estimation Theory. University of California.
- Tan, G., Wen, C., Soh, Y. C. 1997.** Identification for Systems with Bounded Noise. *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. 42; 996-1001.
- Xia, Q., Rao, M., Ying, Y., Shen, X. 1994.** Adaptive Fading Kalman Filter with an Applications. *Automatica*, Vol.30, No: 8; 1333-1338.
- Xie, L., Soh, Y.C., Souza, C. 1994.** Robust Kalman Filtering for Uncertain Discrete-Time Systems.. *IEEE Trans. Auto.Control.*, Vol. AC-39; 1310-1314.
- Wang, L. and Langari, R. 1996.** A variable forgetting factor RLS algorithm with application to fuzzy time-varying system identification. *International Journal of Systems Science*, Vol. 27; 205-214.
- Weston, P. F. and Norton, J. P. 1997.** Detection and Estimation of Abrupt Changes in Input State. *Int. J. Control*, Vol. 67; 699-711.
- Wojcik, P.C. 1993.** On-line Estimation of Signal and Noise Parameters and the Adaptive Kalman Filtering. In *Approximate Kalman Filtering*, ed. G.Chen, World Scientific Publisher; 87-111.
- Wu, H. and Chen, G. 1993.** Suboptimal Kalman Filtering for Linear Systems with Non-Gaussian Noise. In *Approximate Kalman Filtering*, ed. G.Chen, World Scientific Publisher; 113-135.
- Yaz, E. 1990.** Robustness of Stochastic-Parameter Control and Estimation Schemes. *IEEE Trans. Auto.Control.*, Vol. AC-35; 637-640.
- Ydstie, B.E. and Sargent, R.W.H. 1986.** Convergence and Stability Properties of an Adaptive Regulator with Variable Forgetting Factor. *Automatica*, Vol.22; 749-751.