

재귀적 최소 자승 추정법을 사용한 원격 센서 시스템

Passive Telemetry Sensor System using Recursive Least Squares Estimation

김경엽* 이준탁**

동아대학교 전기공학과 지능제어 연구실

Kyung-Yup Kim* Joon-Tark Lee**

Dept. of Electrical Engineering Graduate School of Dong-A University

E-mail : *kykimic@smail.donga.ac.kr

**jtleee@mail.donga.ac.kr

요 약

열악한 환경에서 동작해야 하거나 물리적 접근이 어려운 곳에 장착되는 센서 시스템의 경우, 유선에 의한 정보전달이 어려울 뿐만 아니라 센서 내 전원설비가 제한적일 수도 있다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 문제점에 대한 해결책으로서 밧데리없이 유도결합에 의하여 원격 센서로부터 정보 취득이 가능한 한 방법을 제안하였다. 이 방법은 전원공급에 의한 유도결합식의 원격센서 시스템과는 달리, 원격 센서의 정전용량을 변·복조 과정 없이 재귀적 최소 자승 추정법에 의해 센서의 정전용량을 고정도로 추정하는 것이다. 이를 위하여 시스템의 유도결합 모델을 사용하여 정확도가 높은 원격 센서 시스템을 구현할 수 있었다.

1. 서론

센서가 열악한 환경에서 동작해야 하거나 물리적인 접근 자체가 불가능한 여타 계측 응용 분야에서는 무선 동작이 바람직하다고 하겠다. 이러한 센서 시스템은 이식용 혈압센서, 이식용 습도센서, 이식용 안압센서 그리고 각 센서들에 wire를 연결하는 것이 쉽지 않은 정밀계측분야에 응용되므로, 원격으로 전원 공급이 되어야하고, 적은 공간과 충분한 분해능 및 감도가 재고되어야 한다. 근래 들어선 환자에게 ID를 부여할 목적으로 개발된 도구들이 간단한 수술을 통해 인간의 몸에 이식되기도 하며, 눈에 이식된 렌즈 안쪽 면에 압력을 측정하도록 되어있는 안압센서와 같이, 특정 지점에서의 압력을 측정하기 위해서 센서가 체내에 이식되기도 한다.

Fig. 1은 기존의 원격 센서 시스템 대한 개략도를 나타낸다. 먼저, 송신기가 측정 명령 신호를 보냄과 동시에 일정한 RF 신호를 보내어 센서에 전원을 공급하게 된다. 측정된 값은 디지털

신호로 변환되며 메모리에 저장되어 즉시 변조된 신호를 안테나를 통해 전송시키게 된다. 이러한 과정에서 샘플링 비를 증가시킨다거나, 혹은 발진주파수를 증가시키는 경우, 전력을 높여야 할 필요가 있는데 경우에 따라 크기와 출력에 제약을 받게 되면 그것도 용이하지 않다.

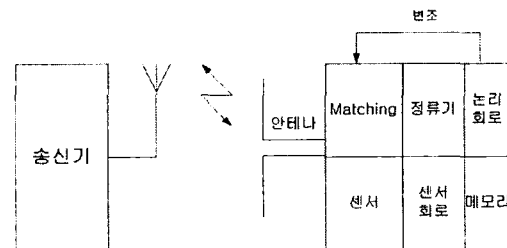


Fig. 1 Schematic of the traditional passive telemetry sensor system

기존 방식의 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 센서 신호를 취득하기 위해 기존

의 방식과는 달리 다양한 주파수 신호를 사용하여 정전용량형 센서의 정전용량을 측정한다. 측정하는 방법으로 재귀적 최소 자승 추정법을 사용하여 센서가 가지는 정전용량을 추정하도록 한다.

2. 시스템 설계 및 해석

원격 센서 시스템은 두 부분 즉 송신부와 센서부로 나뉜다. 센서부는 기존의 원격 센서 시스템과는 달리, 내부에 능동소자를 가지지 않는다. Fig. 2는 제안된 원격 센서 시스템의 동작원리인 두 개의 안테나 코일 사이의 유도결합을 보여주고 있다.

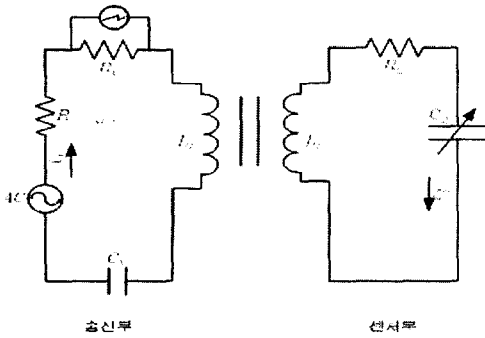


Fig. 2 Principle of passive telemetry system

교류 전류가 송신부에서 생성되며, 그로 인해 발생하는 쇄교 자속에 의해 센서부 코일에 기전력이 유기되어 전류가 흐르게 된다. 이때 센서부 가변 요소인 정전용량형 센서의 정전용량이 변함으로써 센서부 임피던스가 함께 변동된다. 이는 전체 임피던스에서 센서측 임피던스가 증가된 반사 임피던스의 변화를 의미하는 것이며, 이를 감지하여 실제 센서의 정전용량 값을 알 수가 있다.

2.1 정전용량형 습도센서

상대습도센서는 다양한 물질(섬유과생물질, 전해질, 세라믹, 그리고 폴리아미드 등)로 제작되며, 본 논문에서는 우수한 선형성, 낮은 히스테리시스 특성을 가지는 폴리아미드로 제작된 정전용량형 습도센서를 사용하기로 한다. 폴리아미드는 유전체 물질이며 식 (1)에 의해 습도와 정전용량 c_2 와의 관계를 얻을 수 있다.

$$c_2 = 1.8 \times 10^{-10} \times (1.25 \times 10^{-7} \times RH^3 - 1.36 \times 10^{-5} \times RH^2 - 2.19 \times 10^{-3} \times RH + 9 \times 10^{-1}) \quad (1)$$

Fig. 3은 습도와 정전용량과의 관계를 보인다.

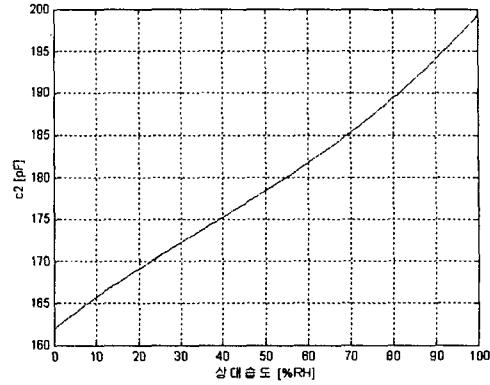


Fig. 3 Characteristics of humidity sensor

2.2 원격 센서 시스템 모델링

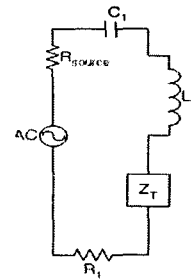


Fig. 0 Equivalent circuit model of proposed passive telemetry sensor system

Fig. 4는 Fig. 2에 대한 등가회로로서 원격 센서 시스템의 등가모델이다. 송신부와 센서부는 상호인덕턴스 M 을 가지고 유도결합 되어있고 센서부 임피던스 Z_{sensor} 는 Z_T 라는 반사임피던스에 포함되어 나타나게 된다.

$$Z_T = \frac{(\omega M^2)}{Z_{sensor}} = \frac{\omega^2 M^2}{(j\omega L_2 + R_2 + \frac{1}{j\omega C_2})} \quad (2)$$

여기서, ω 는 각속도를 의미한다.

입력전압 V_{in} 과 저항 R_1 에서의 전압강하 V_{out} 의 비를 구해보면 식 (3)과 같으며, 여기서 M 과 C_2 은 미지수이며 우리가 알고자 하는 값들이다. 이 값들을 추정하기 위해 재귀적 최소 자승법을 적용할 것이며 이를 위해 식 (3)의 역수인 $1/G(j\omega)$ 을 구해서 그 실수부를 y_1 이라 하고 허수부를 y_2 라고 정해서 모델을 간소화하면 식 (4)와 같다. 다시, 식 (3)의 $1/C_2$ 와 M^2 를 각각 x_1, x_2 로 치환하여 식 (4)의 y_1 과 y_2 을 식

(5)와 식 (6)의 방정식으로 나타낼 수 있다.

$$G(j\omega) = \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3)$$

$$= \frac{R_1}{(R_1 + R_0) + j(\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}) - \frac{\omega^2 M^2}{R_2 + j(\omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2})}}$$

$$\frac{1}{G(j\omega)} = y_1 + jy_2 \quad (4)$$

$$y_1 = \frac{(R_1 + R_0)}{R_1} - \frac{\omega^2 R_2 x_2}{R_1 (R_2^2 + (\omega L_2)^2 - 2L_2 x_1 + \frac{x_1^2}{\omega^2})} \quad (5)$$

$$y_2 = \frac{\omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}}{R_1} + \frac{(\frac{\omega^2}{R_1}) \cdot x_2 \cdot (\omega L_2 - \frac{x_1}{\omega})}{R_2^2 + (\omega L_2)^2 - 2L_2 x_1 + (\frac{x_1}{\omega})^2} \quad (6)$$

y_1 와 y_2 는 $G(j\omega)$ 의 절대값과 위상차를 통해서 얻을 수 있다.

$$y_1 + jy_2 = \frac{1}{|G(j\omega)|} (\cos \phi + j \sin \phi) \quad (7)$$

여기서 $\phi = -\angle G(j\omega)$ 이다.

다시, 식 (5)와 식 (6)를 선형화시키기 위해 파라미터들을 재배열시킨다. 즉 $x_3 = x_1^2$ 으로 그리고 $x_4 = x_1 x_2$ 로 대체하여 x_1 에서 x_4 까지 네 개의 변수로 식을 표현하게 된다.

$$\phi_1 x_1 + \phi_2 x_2 + \phi_3 x_3 + \phi_4 x_4 = z_1 \quad (8)$$

$$\phi_5 x_1 + \phi_6 x_2 + \phi_7 x_3 + \phi_8 x_4 = z_2 \quad (9)$$

$$\begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_1 & \phi_2 & \phi_3 & \phi_4 \\ \phi_5 & \phi_6 & \phi_7 & \phi_8 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix}$$

혹은
$$\vec{Z} = \Phi \vec{X} \quad (10)$$

이들 회귀변수 $\phi_1 \sim \phi_8$ 은 Table 1에서 볼 수 있듯이 입력 주파수에 따라 변동되며 재귀적 최소 자승 추정법에 의해 네 개의 변수 $x_1 \sim x_4$ 가 추정된다. 추정에 필요한 원하는 데이터 쌍은 다양한 입력주파수 인가시 얻게 되는 이득 $G(j\omega)$

와 위상차 $\angle G(j\omega)$ 을 통해 회귀변수와 출력을 얻게 된다.

Table 1 Regressor variables and Outputs

ϕ_1	$(y_1 - \frac{R_0 + R_1}{R_1})2L_1$	ϕ_2	$-\omega^2 R_2 / R_1$
ϕ_3	$(y_1 - \frac{R_0 + R_1}{R_1}) \frac{1}{\omega^2}$	ϕ_4	0
ϕ_5	$(y_2 - \frac{\omega L_1 - 1/\omega C_1}{R_1})2L_2$	ϕ_6	$\omega^3 L_2 / R_1$
ϕ_7	$(y_2 - \frac{\omega L_1 - 1/\omega C_1}{R_1}) \frac{1}{\omega^2}$	ϕ_8	$-\omega / R_1$
z_1	$(y_1 - \frac{R_0 + R_1}{R_1})(R_2^2 + (\omega L_2)^2)$		
z_2	$(y_2 - \frac{\omega L_1 - 1/\omega C_1}{R_1})(R_2^2 + (\omega L_2)^2)$		

측정된 시스템 출력 $\vec{Z} = [z_1 \ z_2]'$ 와 시스템 모델에 의해 얻어진 출력 $\vec{Z} = [\hat{z}_1 \ \hat{z}_2]'$ 를 비교하여 발생한 오차에 식 (11)의 수정인자 $\vec{K}(t)$ 를 곱한 양을 이전에 추정된 변수 벡터 $\vec{X} = [\hat{x}_1 \ \hat{x}_2 \ \hat{x}_3 \ \hat{x}_4]'$ 에 적용함으로써 이를 원하는 값에 수렴시켜간다. 이러한 계산 과정이 재귀적으로 이루어지기 때문에 온라인 추정시에 이용될 수 있다.

$$\vec{X}(t) = \vec{X}(t-1) + \vec{K}(t)(\vec{Z}(t) - \Phi(t) \vec{X}(t-1)) \quad (10)$$

$$\vec{K}(t) = \vec{P}(t-1) \Phi^T(t) (\lambda \vec{I} + \Phi(t) \vec{P}(t-1) \Phi^T(t))^{-1} \quad (11)$$

$$\vec{P}(t) = (\vec{I} - \vec{K}(t) \Phi(t)) \vec{P}(t-1) / \lambda \quad (12)$$

여기서, 망각을 λ 는 시변 변수 \vec{X} 를 추정하는데 사용되어진다. 본 시스템에서는 고정된 변수를 대상으로 하므로 망각율은 언급하지 않는다.

위의 식을 기반으로 추정 모델을 Fig. 5와 같이 구현하였다.

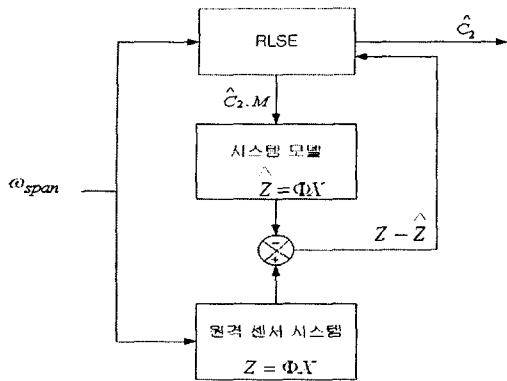


Fig. 5 Block diagram of RLSE system

여기서 ω_{span} 은 각속도 $\omega_{\star t}$ 에서 시작해 각속도 ω_{stop} 까지의 주파수 영역을 의미하며, \hat{C}_2 는 ω_{span} 에 대한 이득·위상선도로부터 이득이 최대가 되는 공진주파수 $\omega_0 = 2\pi f_0$ 에서의 정전용량 C_2 의 추정치이다.

3. 결과 및 고찰

실험에서 사용된 파라미터 값을 Table 2에서 나타낸다.

Table 2 System Parameters

파라미터	값	파라미터	값
L_1	700[μH]	C_2 초기값	4000[pF]
C_1	80[pF]	M	8.2[μH]
L_2	50[μH]	R_{source}	30[Ω]
C_2	160,180,200 [pF]	R_2	10[Ω]
R_1	5[Ω]	ω_{span}	590 ~ 700[kHz]에서의 각속도
λ	0.7	두 코일 사이거리	2.5[cm]

Fig. 6은 $C_2 = 160[pF], 180[pF], 200[pF]$ 인 경우 시스템의 수렴패턴과 이득 $G(j\omega)$ 및 위상선도 $\angle G(j\omega)$ 를 보여주고 있다. 오차 추정 알고리즘을 사용한 시스템은 Fig. 6(a)에서 1200개의 데이터 쌍으로 원하는 값에 오차 없이 수렴해 나가며 그때 얻어진 이득 및 위상선도는 원하는 C_2 값에서의 Fig. 6(b) 이득선도와 Fig. 6(c) 위상선도와 일치함을 알 수 있었다. Fig. 6(b)와 Fig. 6(c)에 나타나는 '*', 'o', 'x' 표시는 $C_2 = 160[pF], 180[pF], 200[pF]$ 에서의 공진점을 의미한다.

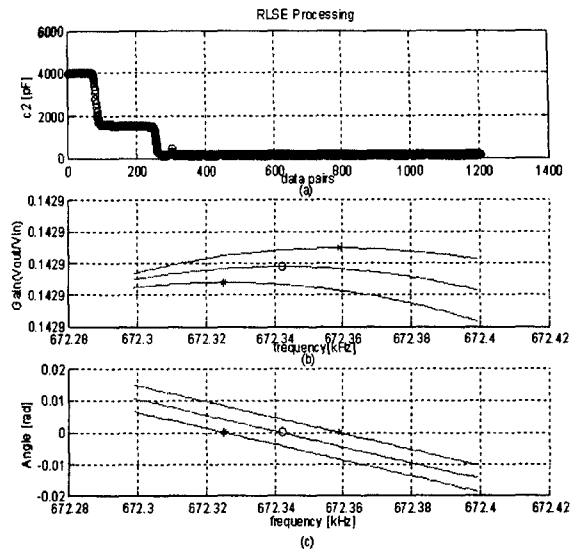


Fig. 6 Convergence Patterns, Gain and Phase Diagrams by RLSE

Fig. 7은 원격 센서 시스템의 공진주파수에 대한 센서의 정전용량 C_2 와의 관계를 나타낸다.

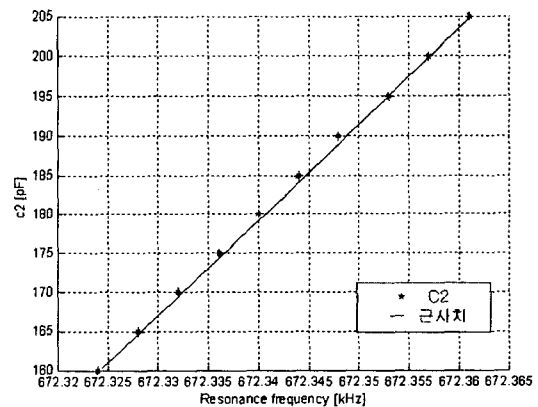


Fig. 7 Resonance Frequency vs C_2

4. 결론 및 향후과제

본 논문에서는 제안한 재귀적 최소 자승 추정법을 이용하여 정전용량형 습도센서의 정전용량을 오차 없이 추정할 수 있었으므로 실제 시스템으로의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 향후에는 제안한 알고리즘을 이용하여 시간에 따라 값이 변화하는 센서의 정전용량에 대해 망각율을 고려한 추종시스템을 개발하고 그 성능을 검증할 것이다.

5. 참고문헌

[1] K.J. Cho and H.Harry Asada, "A Recursive

Frequency Tracking Method for Passive Telemetry Sensors", d, Arbeloff Laboratory for Information Systems and Technology, 2003

[2] J.-S.R.Jang, C-T.Sun, E. Mizutani, Neuro-Fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall, 1997

[3] Timothy J.Harpster, Brain Stark, Khalil Najafi, "A Passive Wireless Integrated Humidity Sensor", The 14th IEEE International Conference on MEMS, pp. 553-557, 2001

[4] Takeharu Suzuki, "Performance of Polyimide-Based Humidity Sensor", Microelectronic Engineering Research Conference 2001

[5] K.J.Astrom, B. Wittenmark, Adaptive Control, Addison-Wesley Publishing Company, 1995