

선박용 위성 안테나 시스템의 안정화 알고리즘 설계

김민정*, 황승욱**

Stabilized Algorithm Design of a Shipboard Satellite Antenna System

Min-Jung Kim*, Seung-Wook Hwang**

Abstract

This paper presents the stabilization of a shipboard satellite antenna system. Hardware systems composing the pedestal, pedestal control unit and antenna control unit are designed and stabilization control law is obtained. A model on each control axis is derived and its parameters are estimated using a genetic algorithm, and the optimal state controller is designed based on the estimated model. An experimental result demonstrates the effectiveness of the proposed system.

1. 서론

위성통신은 망 구성의 광역성, 회선 구성의 신속성 및 효율성, 이동의 용이성 등의 장점이 있어 이에 대한 연구와 개발이 확대되고 있다^{1,2)}. 특히, 선박에서 이용되는 위성통신 서비스는 주로 국제해사 위성(International Maritime Satellite: INMARSAT)과 직접방송위성(Direct Broadcast Satellite: DBS)을 통해 이루어지고 있다. INMARSAT은 선박 상호간 및 선박과 육상간의 신뢰성 있는 광역 통신망을 확보함으로써 해상통신 및 조난구조 통신망으로 이용되고 있으며, 선박의 효율적인 운항관리, 좌표

식별, 원격감시 등으로 그 응용 범위가 확대되고 있다³⁾. 또한, 최근 지역단위 위성방송의 구축이 확대됨에 따라 해기사들의 복지 향상 차원에서 DBS 수신기의 선박내 장착이 확대되고 있다⁴⁾.

이와 같은 서비스를 항행 중인 선박에서 이용하기 위해서는 위성 안테나 시스템의 하드웨어과 설정된 위성을 지향하도록 안테나를 안정화(Stabilization)하고 선박이 이동할 때 지향각을 변경시켜주는 트래킹(Tracking) 기능을 가지도록 소프트웨어 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 국산 선박용 위성 안테나 시스템을 개발하기 위한 선행 연구로 먼저 하드웨

* 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정

** 한국해양대학교 자동화·정보공학부 교수

접수일자 : 1998년 11월 17일

어장치를 설계, 개발하고 선박운동에도 불구하고 안테나 Pedestal을 수평으로 유지하는 안정화 문제를 다룬다. 안테나 Pedestal을 롤링, 피칭, 요잉 축으로 회전할 수 있도록 설계함으로써 각 축은 선박의 운동을 축 단위로 분해하여 검출하고 보상할 수 있도록 한다. 안정화 제어를 구성하기 위하여 설계된 시스템으로부터 모델을 얻고, 유전알고리즘 기법으로 퍼라미터를 추정한다. 이 추정된 모델에 기초하여 최적 상태제어기가 설계된다.

제안된 시스템을 구현하기 위하여 경사각과 각속도 센서가 이용되고, 검출된 신호로부터 계산된 제어기 출력은 Pedestal 축의 구동부에 전달된다. 구현된 알고리즘은 멀티태스킹 커널(Multi-tasking Kernel)을 이용하여 기능별로 포팅(porting)하며, Pedestal 제어 장치의 하드웨어는 V25 마이크로프로세서를 이용하여 설계, 구현한다.

2. 위성 안테나 시스템의 구조

2.1 선박의 운동

항해중인 선박은 그림 1과 같이 6자유도(6-Degree) 운동을 하게 된다. 이 운동은 선박 중심의 직교 좌표축을 기준으로 한 병진운동(X축의 서어징(Surging), Y축의 스웨이잉(Swaying), Z축의 하이빙(Heaving))과 3축을 중심으로 한 회전운동(롤링(Rolling), 피칭(Pitching), 요잉(Yawing))으로 구분된다.

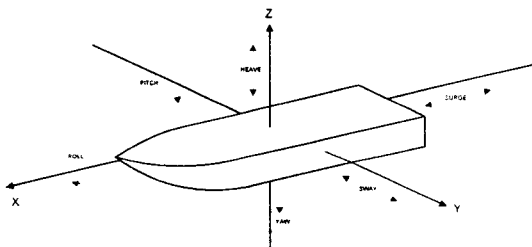


그림 1. 선박의 6자유도 운동

이러한 병진운동과 회전운동은 안테나의 지향각에 영향을 주게된다. 안테나와 위성까지의 거리는 상대적으로 멀므로 병진운동에 의한 영향은 무시될 수 있으나, 회전운동은 지향각에 절대적인 영향을 미치게 된다. 특히 회전운동 중에서 롤링과 피

칭은 안테나의 수평오차를, 요잉은 방향 오차를 발생시키는 요인이 된다.

2.2 시스템의 구성

본 연구에서 제안하는 위성 안테나 시스템은 크게 SAP(Stabilized Antenna Pedestal), PCU(Pedestal Control Unit), ACU(Antenna Control Unit)로 구성된다. 그림 2는 이를 보여주고 있다.

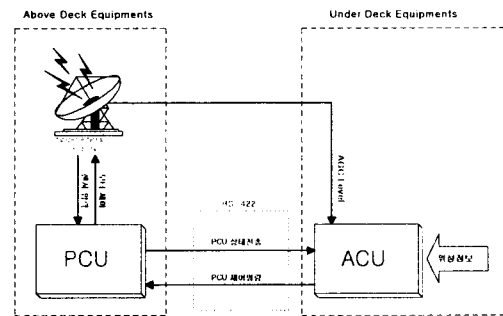


그림 2. 제안된 선박용 위성 안테나 시스템

2.3 Stabilized Antenna Pedestal(SAP)의 구조

SAP는 상갑판에 설치되는 디쉬(Dish)와 구동부를 포함한 기계구조를 말한다. SAP는 3축 구조로 설계되고(그림 3 참조), 각 축의 중앙에 액츄에이터를 장착시켜 축 단위로 제어가 가능하도록 하였다. 롤링과 피칭 축에 설치된 액츄에이터는 안테나를 수

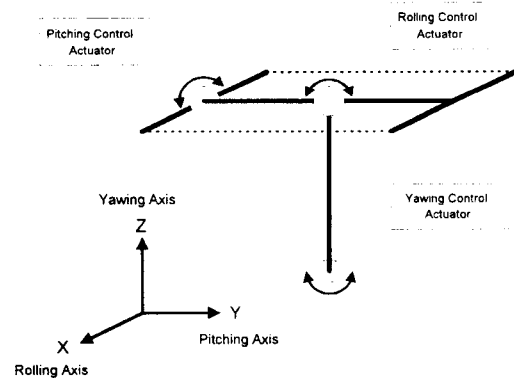


그림 3. SAP의 축 구조

평으로 유지하기 위한 것이고, 요잉 축에 설치된 것은 안테나의 방위각을 일정하게 유지하기 위한 것이다. 각 축에는 센서를 부착하여 SAP의 운동을 축 단위로 분해하여 감지할 수 있도록 하였다.

이렇게 함으로써 좌표변환이 불필요하며, 시스템의 제어가 보다 간단해지며, 신뢰성이 높아지게 된다.

2.4 Pedestal Control Unit(PCU)

PCU는 SAP에 설치되어 위성 안테나 시스템의 초기화, 안정화, 트래킹 기능을 수행한다(그림 4 참조). 초기화 기능은 각종 하드웨어 소자와 소프트웨어 변수들을 초기화한다. 안정화 기능은 선박의 롤링과 피칭 운동에 따라 나타나는 안테나의 기울기 변화를 예측하고 실시간으로 제어하여 Pedestal을 수평으로 유지시키는 역할을 한다. 트래킹 기능은 ACU로부터 통신을 통해 입력받은 위성 신호의 세기를 이용하여, 선박의 이동에 대한 위성 지향 기능이다. 위성 지향각(Azimuth, Elevation) 성분은 Pedestal이 수평으로 유지된 상태에서 선박이 이동할 때 고려되는 값이다.

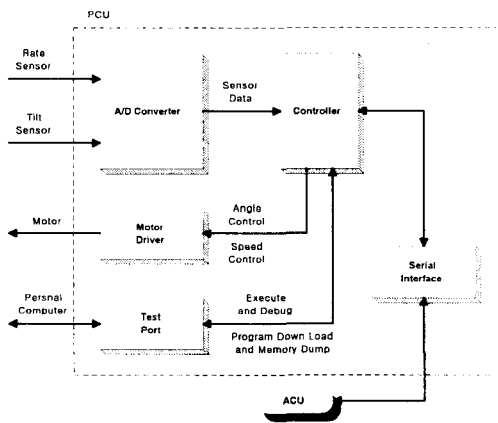


그림 4. PCU의 기능

PCU를 구성하는 하드웨어는 센서, 액츄에이터 구동, 직렬통신에 관계된 것으로 나뉜다. 센서부는 각도와 각속도 센서의 출력을 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환기, 출력되는 신호의 레벨 조정 및 소프트웨어적으로 데이터 포맷을 읽어들이는 부분

들로 구성된다. 액츄에이터 구동부는 제어기가 센서로부터의 측정치를 받아서 해당 액츄에이터를 구동하는 기능을 갖는다. 직렬 통신부는 ACU로부터 안테나의 방위각과 양자, 트래킹 기능에 필요한 위성의 RF 신호 세기를 전송 받는다.

한편, 테스트 포트는 테스트 프로그램의 다운 로드, 메모리 덤프, 테스트 프로그램의 실행기능을 수행한다.

2.5 Antenna Control Unit(ACU)

하갑판에 설치되는 ACU는 사용자로부터 위성 및 채널 신호를 입력받아 위성 위치와 채널 명령을 PCU에 전달하며, 또한 선택된 위성의 RF 신호 세기를 입력받아 위성을 추종하기 위한 신호를 PCU에 전달하는 기능을 갖는다. ACU는 시스템의 초기화, 사용자 인터페이스, RF 신호의 AGC추정을 통한 트래킹 보조 기능, 자이로 인터페이스기능, PCU와의 직렬 통신부분으로 구성된다. 그림 5는 ACU의 기능을 나타낸다.

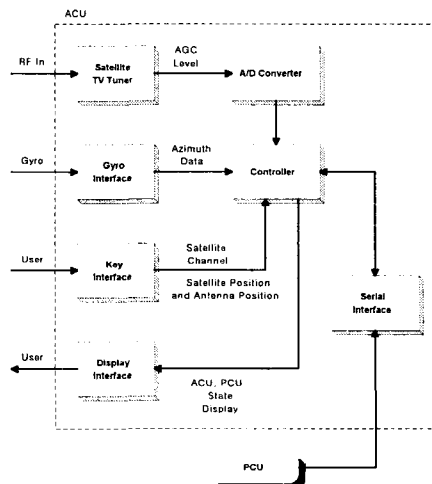


그림 5. ACU의 기능

3. 안테나 Pedestal의 모델링

3.1 시스템 모델

Pedestal의 각 축은 독립적으로 제어되도록 설계

되므로, 역추레이터의 입력(제어입력)으로부터 경사 각 센서 출력까지 모델 방정식을 쓰면 다음과 같다:

$$\theta_i(s) = \frac{K_i e^{-L_i s}}{(1 + T_i s)} U_i(s) \quad (i = r, p) \quad \dots\dots\dots (1)$$

여기서 $U_i(s)$ 는 제어입력, $\theta_i(s)$ 는 경사각, K_i 는 이득, T_i 는 시정수, L_i 는 시간지연이다. 식에서 첨자 r 는 롤링 축, p 는 피칭 축을 뜻한다. 특히 선박의 운동 변화는 제어시간에 비하면 매우 느리므로 시스템에 부과되는 외란은 제어시간 동안 일정한 것으로 간주한다.

식 (1)에서 시간지연 요소를 일차계로 근사화하고, 상태변수를 다음과 같이 정의하면

$$x_{i1} = \theta_i \quad \dots\dots\dots (2a)$$

$$x_{i2} = \dot{\theta}_i - b_{i1} u_i \quad \dots\dots\dots (2b)$$

다음과 같은 동적방정식을 얻을 수 있다.

$$(S) \begin{cases} \dot{x}_i = A_i x_i + B_i u_i + d_i & (i = r, p) \quad \dots\dots\dots (3) \\ y_i = C_i x_i \end{cases}$$

여기서 $x_i = [x_{i1} \ x_{i2}]^T$ 는 상태벡터, $y_i = \theta_i$ 는 출력, d_i 는 외란이며, 그외 행렬과 변수들은 다음과 같다:

$$A_i = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ -a_{i2} & -a_{i1} \end{pmatrix}, \quad B_i = \begin{pmatrix} b_{i1} \\ b_{i2} - a_{i1} b_{i1} \end{pmatrix}, \quad \dots\dots (4a)$$

$$C_i = [1 \ 0]$$

$$a_{i1} = \frac{2}{L_i} + \frac{1}{T_i}, \quad a_{i2} = \frac{2}{T_i L_i}, \quad b_{i1} = -\frac{K_i}{T_i} \quad \dots (4b)$$

$$b_{i2} = \frac{2K_i}{T_i L_i}$$

3.2 유전알고리즘을 이용한 파라미터 추정

모델의 구조와 차수가 결정되면 다음 작업은 모델의 파라미터들을 추정하는 것이다. 이를 위해 입출력 신호의 측정이 필요하다. 시스템이 동작점(평형 상태)에 있을 때, 제어입력과 경사각 신호 데이터를 수집하였다. 이 때 샘플링 시간은 $T = 0.1[\text{sec}]$ 로 선정하였고, 사용된 입력신호는 다음과 같다.

$$u_i = 10 \sin\left(\frac{\pi}{30} t\right) + \sin\left(-\frac{\pi}{10} t\right) + 5 \sin\left(\frac{\pi}{6} t\right) \quad (i = r, p) \quad \dots (5)$$

유전알고리즘과 모델조정기법으로 롤링과 피칭 축 모델의 파라미터를 얻기 위한 구성도는 그림 6과 같다. 적응 메카니즘으로 실수코딩 유전알고리즘^[5]을 사용하였고, 유전알고리즘은 시스템과 모델의 출력 차가 최소가 되도록(모델의 동특성이 시스템의 동특성에 가깝도록) 계속적으로 모델의 파라미터를 조정하게 된다^[6].

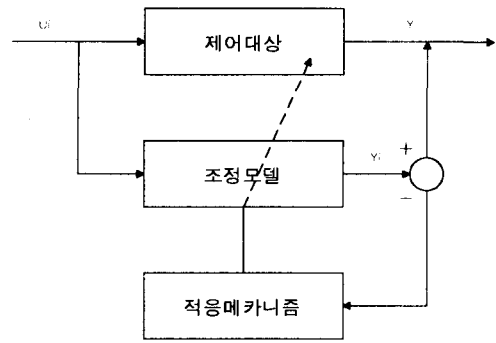


그림 6. 모델의 파라미터 추정 구성도

개체집단이 진화해 가는 동안 유전알고리즘은 개체간의 우열(각 개체로부터 복호화된 변수로 설정된 모델의 성능)을 가리기 위하여 적합도를 필요로 하는데, 적합도는 다음 목적함수로부터 계산된다.

$$J(\phi) = \sum_{k=1}^W |y(k) - y_i(k)| \quad \dots\dots\dots (6)$$

여기서 $\phi = [K_i \ T_i \ L_i]^T$ 는 조정되는 벡터이고, W 는 적절히 선정되는 데이터의 크기이다.

유전알고리즘의 제어 파라미터(Control Parameter)로 집단크기 $N = 20$, 재생산 계수 $\eta_j = 1.7 \ (1 \leq j \leq N)$, 교배확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.1$ 를 사용하였다^[5]. K_i, T_i, L_i 의 탐색 구간은 $0 < K_i, T_i, L_i \leq 5$ 로 설정하였다. 그리고 사용된 데이터 크기는 $W = 2,000$ 이었다.

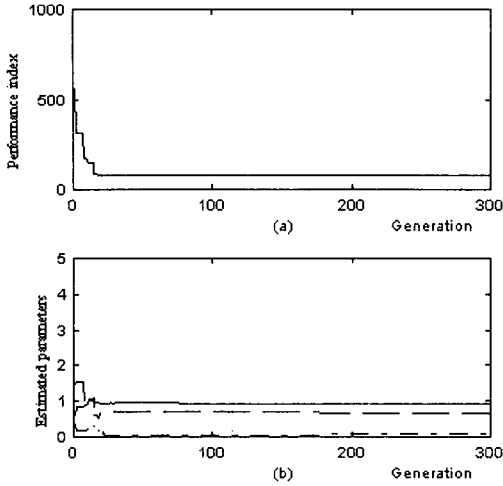


그림 7. 파라미터 추정 과정 (a) 성능지수, (b) 추정 파라미터

추정실험 결과 로링과 피칭 축 시스템의 파라미터 추정치는 유사하였고(Pedestal의 구조적 유사성), 그 결과치로 $K_i = 0.941$, $T_i = 0.642$, $L_i = 0.094$ ($a_{i1} = 22.743$, $a_{i2} = 32.980$, $b_{i1} = -1.465$, $b_{i2} = 31.044$)를 얻었다. 그림 7은 파라미터 추종 과정의 한 예를 보여준다.

4. 안정화 제어기 설계

제어시스템 설계 시 제어기는 운전 중 외란 또는 시스템 파라미터 변화에도 정상편차 없이 만족스러운 응답특성을 주어야 한다. 안테나 Pedestal의 안정화는 결국 최적 조정기(Optimal Regulator) 설계 문제로 귀착되므로 제어시간 동안 일정한 외란으로부터 발생할 수 있는 정상편차를 줄이기 위하여 적분기를 도입한다.

$$z_i = \int y_i dt \quad \dots\dots\dots (7)$$

양변을 한번 미분하고 식 (3)과 결합하면

$$(\tilde{S}_i) \begin{cases} \dot{\tilde{x}}_i = \tilde{A}_i \tilde{x}_i + \tilde{B}_i u_i + \tilde{d}_i & (i = r, p) \\ y_i = \tilde{C}_i \tilde{x}_i \end{cases} \quad (8a)$$

여기서

$$\tilde{x}_i = \begin{pmatrix} x_i \\ z_i \end{pmatrix}, \quad \tilde{A}_i = \begin{pmatrix} A_i & 0 \\ C_i & 0 \end{pmatrix}, \quad \dots\dots\dots (8b)$$

$$\tilde{B}_i = \begin{pmatrix} B_i \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{d}_i = \begin{pmatrix} d_i \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \tilde{C}_i = [C_i \ 0]$$

식 (8)은 원래의 시스템이 가제어하고, $\rho \begin{pmatrix} B_i & A_i \\ 0 & C_i \end{pmatrix} = 3$ 이므로 확장시스템 (\tilde{S}_i) 역시 가 제어하게 된다⁷⁾. 확장시스템에서 외란을 제외한 시스템을 점근적으로 안정하게 하면서 다음의 평가함수를

$$J_i = \int_0^{\infty} (\tilde{x}_i^T Q_i \tilde{x}_i + \tilde{u}_i^T r_i \tilde{u}_i) dt \quad (i = r, p) \quad \dots\dots (9)$$

최소로 하는 제어법칙은 다음과 같다.

$$u_i = -G_i \tilde{x}_i = -G_{i1} x_i + g_{i2} \int y_i dt \quad (i = r, p) \quad \dots (10)$$

여기서 $G_i = [G_{i1} \ g_{i2}] = -r_i^{-1} \tilde{B}_i^T K_i$ 이고 K_i 는 Riccati 행렬방정식의 해가 된다. 한편 식 (9)에서 Q_i 와 r_i 는 각각 양의 반한정 행렬, 양의 계수이고 전체 시스템의 성능을 결정짓는 중요한 변수로서, 사용자에 의해 적절히 결정된다.

5. 실험 및 결과 고찰

제안한 알고리즘으로 구현된 시스템의 안정화 기능을 확인하기 위하여 실험을 실시하였다. 피드백 이득행렬을 얻기 위해

$$Q_r = Q_p = \begin{pmatrix} 10 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 50 \end{pmatrix}, \quad R_r = R_p = 5 \quad \dots\dots\dots (11)$$

을 선택하였고, 그 결과 $G_r = G_p = [2.023 \ 0.293 \ 3.162]$ 을 얻었다. 그림 8은 로링과 피칭 축이 각각 $x_r = [20 \ 0]^T$, $x_p = [-10 \ 0]^T$ 위치에 있을 때, 시스템을 가동하고 각 축의 경사각 신호를 계속하고 그 린 것이다.

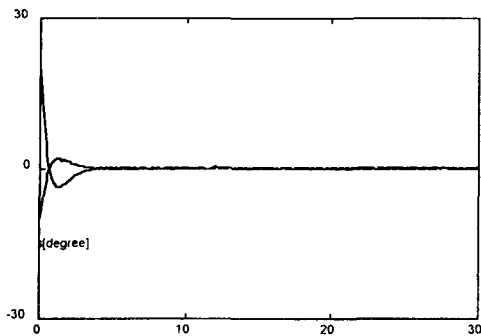


그림 8. 시스템의 응답

그림으로부터 확인할 수 있듯이 만족스러운 응답특성을 얻을 수 있었다.

6. 결 론

본 연구에서는 선박용 위성 안테나 시스템을 설계하고 구현하는 문제를 다루었다. 3축 구조의 안테나 Pedestal과 이를 구동하는 주변장치를 제작하였고, 안정화 제어 시스템을 구성하였다. Pedestal의 안정화 제어를 위해 시스템의 모델을 얻었고, 이에 기초하여 최적 상태제어를 설계하였다. 시험 결과 개발된 시스템은 만족스러운 성능을 가지며, 상용화 가능성을 확인할 수 있었다.

차후 위성탐지 알고리즘 개발과 트래킹을 위한 제어시스템 구성, 사용자 인터페이스, ACU의 기능 설계 등에 대한 추가적인 연구가 필요하며, 실선 테스트 과정도 거쳐야 할 것이다.

참고문헌

- [1] F. Baylin, 1995/96 *World Satellite Yearly*, 1996.
- [2] T. P. Charles and W. Bostian, *Satellite Communications*, John-Wiley & Sons, 1994.
- [3] Sea Tel Inc., *SEATEL Inmarsat-B Stabilized Antenna Manual*, Sea Tel Inc., 1995.
- [4] M. Ando, "New DBS Receiver antenna," *Proc. of the 23rd European Conf. on Microwave*, Madrid, Spain, pp.84-92, 1993.
- [5] 주상래, 이현식, 진강규, "실수코딩 유전알고리

즘과 제어기 동조에 응용," '98 한국자동제어 학술회의 논문집, 제 1권, pp. 342-345, 1998.

- [6] 이현식, 진강규, "유전알고리즘을 이용한 연속시 스템의 온라인 퍼라미터 추정," *제어·자동화·시스템공학회지*, 제 4권, 제 1호, pp. 76-81, 1998.
- [7] B. Poter and A. Bradshaw, "Design of linear multivariable continuous-time tracking systems," *Int. J. Systems Sci.*, Vol. 5, No. 12, pp. 1155-1164, 1974.

김민정(Min-Jung Kim)

- 1993년 2월 영도 여자 고등학교 졸업
- 1993년 3월 한국해양대학교 이공대학 제어계측공학과 입학
- 1997년 2월 한국해양대학교 이공대학 제어계측공학과 졸업
- 1997년 3월 한국해양대학교 동대학원 석사과정 입학
- 1999년 2월 한국해양대학교 동대학원 석사과정 졸업 예정
- 1999년 3월 한국해양대학교 동대학원 박사과정 입학 예정



황승욱(Seung-Wook Hwang)

- 1984년~1986년 : 고려대학교 전자공학과(석사)
- 1989년~1992년 : 고려대학교 전자공학과(박사)
- 1986년~1992년 : 한국전자통신 연구소 TDX개발단 선임 연구원
- 1992년~현재 : 한국해양대학교 제어계측공학과 조교수