

이동형 자기장 유도 통신을 위한 자기장 신호 탐지 기법

김 광 열*, 신 요 안^o

A Magnetic Signal Detection Scheme for Mobile Magnetic Induction Communications

Kwang-Yul Kim*, Yoan Shin^o

요 약

매질의 투자율에 의해 세기가 변화되는 자기장은 수중에서도 공기 중에서도 거의 비슷한 정도의 투자율을 가질 수 있어 공중 뿐 아니라 새로운 수중 통신 방식으로 고려될 수 있다. 그러나 이동형 자기장 유도 통신을 위해서는 기지국이 이동 단말을 탐지해야 하며, 이를 위해 지구 자기장을 보상해야 한다. 따라서 본 논문은 지구 자기장의 경향을 고려하는 이중 지수 평활법 기반의 자기장 신호 탐지 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안 기법이 지구 자기장의 경향을 고려함으로써 탐지 성능을 높일 수 있음을 확인하였다.

Key Words : magnetic induction communications, internet of underwater things, compensation, exponential smoothing, geomagnetic trend

ABSTRACT

For mobile magnetic induction communication systems in underwater as well as air channels, the magnetic signal detection should be primarily considered. In this paper, we propose a double exponential smoothing based magnetic signal detection scheme which considers the geomagnetic field trend. Simulation results show that the proposed

method can improve the detection performance by considering the geomagnetic field trend.

I. 서 론

수중에서 발생하는 정보를 지상에서 확인할 수 있도록 해서 인프라 간 연결을 가능하게 하는 수중 사물 인터넷 (Internet of Underwater Things; IoUT)이 최근에 활발히 연구되고 있다¹⁾. IoUT를 위한 기술에는 이동형 수중 단말의 위치추정, 통신 기술 등이 있으며, 이를 위한 차별화된 기술이 요구된다¹⁾. 한편, 자기장 세기의 감쇠는 매질의 투자율 (Permeability)에 영향을 받게 되는데 자기장은 수중에서도 공기 중에서도 거의 비슷한 정도의 투자율을 가질 수 있어 수중 통신 기술로 고려되고 있다²⁾. 그러나 자기장 유도 통신은 기존의 수중 음향 통신과 달리 전파 특성이 없기 때문에 자기장 범위 내에서만 통신이 이루어지며, 자기장 유도 통신을 위해서는 제일 먼저 수중 기지국이 수중 이동형 단말의 자기장 신호를 탐지하는 과정이 필요하다. 본 논문은 IoUT를 위한 이동형 수중 자기장 유도 통신의 기초연구로서 자기장 신호 탐지 기법을 제안한다. 한편, 수중 환경에서 실제 실험을 수행하기에는 물리적인 한계가 있기 때문에 지상에서 지구 자기장을 측정하고, 모의 신호를 이용하여 기존의 강차성 체 탐지 기법³⁾과 제안된 자기장 신호 탐지 기법을 비교한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 이동형 수중 자기장 유도 통신 시나리오와 단순 지수 평활법 (Single Exponential Smoothing; SES) 기반의 자기장 신호 탐지 기법³⁾을 도시한 것이다. 이동형 수중 단말은 수중 기지국과 정보를 교환하기 위해 자기장을 형성하며 접근하고 있고, 3축 자기 센서로 구성된 수중 기지국은 이동형 자기장 송수신기를 탐지한 이후에 정보를 교환하는 것을 가정한다. 이 때 수중 기지국은 50,000 [nT] 정도 되는 배경 지구 자기장 하에서 이동형 수중 단말의 자기장 신호를 탐지하기 위해 지구 자기장을 보상해야 한다. 다음은 지구 자기장 보상 기법 중 하나인 SES를 표현한 것이다³⁾.

* 본 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구결과임 (2016R1A2B2014497).

• First Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, kky1117@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : School of Electronic Engineering, Soongsil University, yashin@ssu.ac.kr, 중신회원

논문번호 : KICS2017-10-297, Received October 10, 2017; Revised October 13, 2017; Accepted October 13, 2017

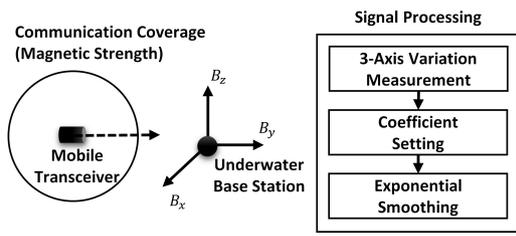


그림 1. 이동형 수중 자기장 유도 통신 시나리오 및 단순 지수 평활법 기반 자기 신호 탐지 기법[3]
 Fig. 1. A scenario for mobile underwater magnetic induction communications and single exponential smoothing based magnetic signal detection scheme[3]

$$\hat{B}_k(t) = \gamma(t) \cdot B_k(t) + (1 - \gamma(t)) \cdot \hat{B}_k(t-1), \quad (1)$$

여기서 $k \in \{x, y, z\}$ 는 x, y, z 축 중 하나의 축이며, t [sec]는 현재 관측 시간, $\gamma(t)$ 는 단순 지수 평활 계수, $B_k(t)$ 는 자기센서에서 측정된 k 축 자기장 신호, $\hat{B}_k(t)$ 는 단순 지수로 평활된 k 축 자기장 신호를 의미한다. 이처럼 센서마다 3축 자기장 신호가 측정되며, 측정된 자기장 신호의 차이가 평활 임계치 T_γ 보다 큰 경우에는 다음 식과 같이 단순 지수 평활 계수를 조절한다[3].

$$\gamma(t) = 0.1 \cdot (1 / (|B_k(t) - B_k(t-1)|)) \cdot T_\gamma. \quad (2)$$

따라서 지구 자기장이 보상된 신호는 다음 식과 같이 표현된다[3].

$$S_s(t) = \sqrt{\hat{S}_x(t)^2 + \hat{S}_y(t)^2 + \hat{S}_z(t)^2}, \quad (3)$$

여기서 $\hat{S}_k(t) = B_k(t) - \hat{B}_k(t)$ 이다. 마지막으로 탐지 성능을 측정하기 위해 자기장 신호가 없는 시간 동안에 지구 자기장의 변화를 분석하여 탐지 임계치 \mathcal{M}_S 를 설정하고, 임계치에 따라 자기장 신호를 탐지한다. 다음 식은 SES의 탐지 결과 $D_S(t)$ 를 표현한 것이다.

$$\begin{cases} D_S(t) = 1, & S_S(t) > \mathcal{M}_S \\ D_S(t) = 0, & S_S(t) < \mathcal{M}_S. \end{cases} \quad (4)$$

III. DES 기반 탐지 기법

지구 자기장은 대부분 지구 내부의 전류의 흐름에 의해 발생되며, 태양풍을 비롯하여 자기센서 주변에서 발생하는 전자 장비에 의해 지구 자기장 신호가 실시간으로 변화된다. 한편, 현재까지 지구 자기장을 실시간으로 정확하게 모델링하는 방식은 없으며, 실험적인

결과로서 자기장 신호를 모델링 할 때 지구 자기장의 경향 (Trend)을 고려한 연구가 진행된 바 있다[4]. 따라서 본 논문은 지구 자기장에 경향이 있다고 가정하고 시계열 분석 방식 중 경향을 고려할 수 있는 이중 지수 평활법 (Double ES; DES)을 선택하였다[5]. 다음은 논문에서 제안한 DES 기반의 자기장 신호 탐지 기법을 설명한 것이다.

3.1 1단계: 자기장 신호 평활 및 예측 단계

다음 식은 일반적인 DES를 표현한 것이다[5].

$$\tilde{B}_k(t) = \alpha \cdot B_k(t) + (1 - \alpha) \cdot \{\tilde{B}_k(t-1) + T_k(t-1)\}, \quad (5)$$

$$T_k(t) = \beta \cdot \{\tilde{B}_k(t) - \tilde{B}_k(t-1)\} + (1 - \beta) \cdot T_k(t-1), \quad (6)$$

여기서 $\tilde{B}_k(t)$ 는 시간 t 에서 이중 지수로 평활된 k 축 값, $T_k(t)$ 는 시간 t 에서의 k 축 경향값, α ($0 \leq \alpha \leq 1$)는 이중 지수 평활 계수, 그리고 β ($0 \leq \beta \leq 1$)는 경향 계수를 의미한다. 한편, 자기장 신호 탐지 시스템은 실시간으로 지구 자기장의 경향을 분석하고 탐지해야 하기 때문에 DES는 다음 식과 같은 $2 \times M$ 크기의 윈도우 필터로 구성된다.

$$\mathbf{W}_k(t) = \begin{bmatrix} \tilde{B}_k(t), \dots, \tilde{B}_k(t+N-1), \tilde{B}_k(t+M-m), \dots, \tilde{B}_k(t+M-1) \\ \tilde{B}_k(t), \dots, \tilde{B}_k(t+N-1), F_k(t+M-m), \dots, F_k(t+M-1) \end{bmatrix}, \quad (7)$$

여기서 N 은 m 개의 신호를 예측하기 위해 사용되는 평활 신호의 개수로서 $N = M - m$ 이다. 그리고 $F_k(t)$ 는 DES로 평활된 신호로부터 예측되는 m 개의 신호로서 다음 식과 같이 표현된다.

$$F_k(t+m) = \tilde{B}_k(t) + mT_k(t). \quad (8)$$

3.2 2단계: 자기장 신호 탐지 단계

제안된 기법의 탐지 방식은 윈도우 필터 내 $1 \times m$ 크기의 평활 신호와 예측 신호의 차이를 서로 비교하는 것으로 자기장 유도 통신 신호가 있을 때에는 평활 신호와 예측 신호가 모두 상향 혹은 하향 직선을 보이면서 큰 차이가 발생된다. 반면, 지구 자기장만 있는 경우에는 평활 신호가 예측 신호를 교차하거나 근접하게 되어 차이가 적게 발생하게 된다. 따라서 탐지를 위한 제안 기법의 신호 $S_D(t)$ 는 다음 식과 같이 표현된다.

$$S_D(t) = \min_{j \in \{1, \dots, m\}} \sqrt{\overline{F_x(j)^2} + \overline{F_y(j)^2} + \overline{F_z(j)^2}}, \quad (9)$$

여기서 $\overline{F_k(j)} = F_k(j) - \overline{B_k(j)}$ 이다.

IV. 성능 평가 및 결론

제안된 기법의 자기장 신호 탐지 성능을 평가하기 위해 그림 1을 고려하였으며, 새벽에 실측한 자기장 신호에 비오-사바르 법칙^[3]을 이용한 자기장 신호를 중첩하여 탐지를 위한 신호를 생성하였다. 성능 평가를 위한 SES의 평활 계수 $\gamma=0.1$ 이며, 이 때 SES의 임계치 $Th_s=0.1489$ [nT]이다. DES의 평활 계수 α 는 0.1, 0.27, 0.8을 고려하였으며, DES의 경향 계수 $\beta=0.94$, DES의 필터 길이 $M=52$ [sec], 예측 시간은 1~50 [sec]이다. 그리고 이동형 단말의 3축 다이폴 모멘트는 {14200, 3700, 4400} [Am^2]^[3]이며, 센서와의 최고근접지점은 50 [m]으로 1 [m/sec]의 속력으로 원거리에서 센서의 정면을 통과한다. 모의실험의 관측 시간은 총 1,200 [sec]이다.

그림 2는 예측 시간에 따라 임계치를 측정하는 것이며, 그림 3은 예측 시간에 따른 임계치를 적용하여 초기 및 총 탐지 시간을 측정하는 것이다. 그림의 결과를 통해 예측 시간에 따라 탐지 시간이 변화되는 것을 볼 수 있었는데, 예측 시간이 10 [sec] 미만일 때에는 총 탐지 시간 대비 초기 탐지 시간이 너무 빠르기 때문에 오탐지라고 볼 수 있다. 따라서 탐지 성능의 향상을 위해서는 최적의 평활 계수 α 와 예측 시간이 필요한 것을 알 수 있으며, 이 환경에서는 $\alpha=0.1$ 이고 예측 시간이 45 [sec] 일 때 탐지 성능이 최적임을 알 수 있다. 이러한 결과는 제안된 기법이 지구 자기장 신호의 경향을 고려함으로써 모의로 생성한 자기장 신호의 경향에 민감하게 반응했기 때문으로 분석할 수 있다.

그림 4는 기존 기법과 제안 기법을 통과한 신호와 탐지 결과를 도식한 것이다. 이 때 제안 기법의 평활 계수 $\alpha=0.1$ 이고 예측 시간은 45 [sec]를 적용하였다. 상단의 그림을 통해 제안된 기법이 지구 자기장의 경향에 민감하게 반응하는 것을 볼 수 있었으며, 이로 인해 초기 탐지 시간을 단축시키고 총 탐지 시간을 확장시킬 수 있음을 확인하였다.

모의실험을 통해, 제안된 기법이 지구 자기장의 경향을 고려함으로써 기존 기법보다 탐지 거리를 향상시킬 수 있음을 확인하였다. 다만, 지구 자기장은 공간과 시간에 따라 실시간으로 변화되기 때문에 모든 상황에 동일한 계수를 적용시키는 것은 비효율적이다.

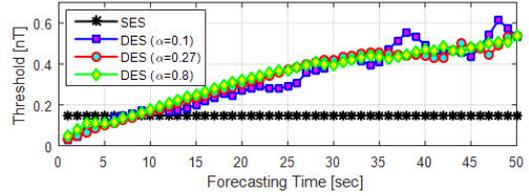


그림 2. 예측 시간에 따른 임계치
Fig. 2. Threshold value according to forecasting time

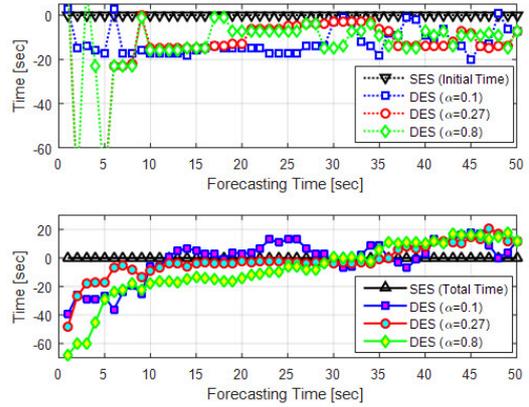


그림 3. 예측 시간에 따른 초기 및 총 탐지 시간
Fig. 3. Initial and total detection time according to forecasting time

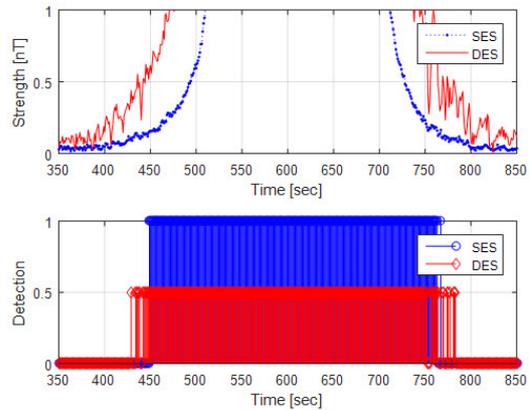


그림 4. 기존 기법과 제안 기법의 필터링 신호와 탐지 결과
Fig. 4. Filtering signals and detection results

따라서 앞으로는 필터 시간과 예측 시간, 그리고 평활 계수와 경향 계수를 지구 자기장 환경에 따라 적응적으로 적용시키는 연구를 수행하고자 한다.

References

[1] M. C. Domingo, "An overview of the internet

- of underwater things,” *J. Network Comput. Appl.*, vol. 35, pp. 1879-1890, Nov. 2012.
- [2] M. C. Domingo, “Magnetic induction for underwater wireless communication networks,” *IEEE Trans. Ant. Propag.*, vol. 60, no. 6, pp. 2929-2939, Jun. 2012.
- [3] M. Kim, U. Joo, C. Lim, S. Yoon, and S. Moon, “A study on detection of underwater ferromagnetic target for harbor surveillance,” *J. KIMST*, vol. 18, no. 4, pp. 350-357, Aug. 2015.
- [4] J. B. Nelson and T. C. Richards, *Magnetic source parameters of MR OFFSHORE measured during trial MONGOOSE 07*, Defense R&D Canada-Atlantic, DRDC Atlantic TM 2007-223, Sept. 2007.
- [5] E. S. Gardner Jr., “Exponential smoothing: The state of the art - Part II,” *Int. J. Forecast*, vol. 22, pp. 637-666, Oct. 2006.