DTDMA 기반 초기 망가입 단말의 효율적 위치 추정 방법

Method for Position Estimation of Network Entry Terminal based on
DTDMA(Dynamic Time Division Multiple Access)

서 난 솔*

Nan Sol Seo

Abstract

In this paper, we analysis the performance of position estimation when adopting Dynamic TDMA(DTDMA) in JTIDS RelNav. JTIDS RelNav is widely understood as a new navigation solution possibly capable to support or take cover of the role of conventional systems including INS or GPS no matter if they are working well or not. By maximizing the efficiency of radio resource management in MAC(Medium Access Control) layer we enhance the system performance without any replacement of hardware.

Keywords : DTDMA, Tactical Datalink, Relative Navigation, Expanded Kalman Filter, Position Estimation

1. 서 론

일반적으로 시분할다중접속(TDMA : Time Division Multiple Access)기반 CNI(Communication, Navigation, and Intelligence) 시스템의 위치추정 기법은 네트워크 내 단말들이 동일 주기를 갖는 시간슬롯을 동등하게 할당받아 위치정보메시지를 전송하는 것을 기본으로 한다. 위치정보메시지를 수신한 단말은 메시지의 송신 시점과 수신시점의 차이인 TOA(Time Of Arrival)를 측정하고 이와 더불어 메시지 내 포함된 송신단말의 위치좌표를 이용하여 삼각측량법에 의해 자신의 위치를 추정한다. 따라서 수신 단말은 적어도 네 개 이상의 송신 단말로부터 메시지를 받아야하며, 수신 단말이

이동 시에는 계속적인 메시지 수신을 받아야 한다. 위치 추정의 정확도는 TOA 측정치와 송신단말의 위치 품질, 그리고 이 두 가지 요소를 제공하는 메시지의 전송 주기에 영향을 받는다.

미국의 JTIDS RelNav와 같은 종래의 방식은 위치추정 정확도를 높이기 위해 할당된 시간 슬롯을 통해 순차적으로 수신되는 위치정보 중 상위 품질의 정보를 선택하여 항법 알고리즘의 입력정보로 사용한다. 위치정보의 품질은 해당 단말의 위치에 대한 오차범위로 정의되며 송신단말들과 수신단말의 기하학적 위치구조에 따라 수신단말 입장에서 송신단말의 위치품질은 다시 계산된다. 이를 기하학적 정확성의 감소(GDOP : Geometric Dilution of Precision)라 하며, 수신단말은 GDOP가 반영된 최상의 source단말 조합을 발견하고 이를 바탕으로 품질테이블을 작성한다. 따라서 망 내 모든 단말들은 같은 송신단말로부터 같은 위치정보메시지를 수신하더라도 서로 다른 품질테이블을

† 2012년 4월 30일 접수~2012년 8월 24일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD)

책임저자 : 서난솔(solbba@add.re.kr)

Fig. 1. Basic principle of Relative Navigation

가지게 된다. 수신 단말은 품질테이블에서 자신의 품질보다 상위 품질을 가지는 단말이 보낸 위치정보에 대해서 항법엔진의 입력정보로 사용한다. 항법엔진은 TOA, 위치정보, 위치품질정보를 입력받아 수신단말의 위치를 추정하며 외부 항법 정보가 있는 경우 이와 결합하여 위치 추정치를 계속 업데이트한다.

그러나 TDMA 접속방식을 사용하는 기존기술에서는 슬롯할당을 고정으로 함으로써 모든 노드에게 동등한 전송기회를 제공하지만, 새로운 망가입 단말과 같이 특정 단말이 단시간에 일정수준 이상의 위치 품질을 갖도록 추정하는 상황에서는 이들에게 필요한 위치정보메시지-품질테이블 상에서 자신의 품질보다 상위 품질을 가지는 단말의 위치정보메시지-만을 선별하여 집중적으로 제공하기 어렵다.

본 논문에서는 동적시분할다중접속방식(DTDMA : Dynamic Time Division Multiple Access)을 사용하는 무선통신시스템에서 상위품질의 위치정보를 보유한 source단말에게 동적으로 슬롯을 다량 할당하여 위치 추정단말이 보다 효율적으로 위치를 추정할 수 있는 방법을 제안한다. 이어지는 2장에서는 JTIDS RelNav로 대표되는 기존 상대항법에 대한 기술적 이슈 및 알고리즘 수행과정을 소개하고, 3장에서는 본 논문에서 제안하는 기술과 구현 방법에 대해 설명한다. 4장에서는 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기술의 성능분석을 수행하였으며, 마지막으로 5장에서 결론을 도출하도록 한다.

2. 기존 기술 - JTIDS RelNav

JTIDS(Joint Tactical Information Distribution System)의

상대항법(Relative Navigation)은 네트워크상의 다른 노드로부터 받은 위치정보메시지(PPLI : Precise Position Location and Identification)와 RTT(Round Trip Time) 메시지 송수신을 이용하여 위치, 속도, 자세(PVT) 등을 결정하는 것으로 중심노드 없이 운용되는 분산형 위치 추정의 대표적인 시스템이다. JTIDS RelNav는 TDMA를 기반의 무선통신망에서 운용되며, 개별 단말은 초당 128개 시간슬롯(슬롯 길이 : 7.8125ms) 중 일부를 할당받아 PPLI메시지를 3~12초 주기로 서로 간에 송수신하여 자신의 위치를 갱신한다.

RTT메시지는 정확한 시각 동기를 유지하기 위해 사용하는 메시지로 개별 단말은 이를 이용하여 GPS 또는 원자시계 등으로 정확한 시간을 유지하고 있는 시간기준노드(NC : Network Controller)에 동기화한다^[1].

W. R. Fried가 제안한 JTDL RelNav 알고리즘^[2]은 먼저 PPLI메시지 수신을 통해 얻게 되는 TOA 관측치와 송신노드의 좌표값을 이용하여 다음과 같은 방정식을 세운다.

$$\rho = c(TOA) = R_c + b_t - b_u + w \quad (1)$$

$$\rho = \sqrt{(x_t - x_u)^2 + (y_t - y_u)^2 + (z_t - z_u)^2} + b_t - b_u + w$$

여기서, R_c 는 유닛 간의 실제 거리로, x_t, y_t, z_t 는 소스 유닛의 x_u, y_u, z_u 는 수신 유닛의 위치 좌표를 각각 나타낸다. b_t 와 b_u 는 시스템 동기 시각에 대한 소스와 수신 유닛의 시간 바이어스이며, w 는 측정치 잡음이다. 식 (1)의 좌변인 상수 $c(TOA)$ 는 측정치로 주어진다. 따라서 x_u, y_u, z_u 와 b_u 를 미지수로 갖는 방정식의 해를 구하는 것이 JTIDS RelNav 알고리즘의 기본 목표이다. 미지수가 네 개인 방정식을 풀기 위해 기본적으로 네

개 이상의 측정치가 필요하게 되며, b_t 는 소스 유닛, 사용자 유닛 입장에서 알 수 없는 파라미터로 이를 측정치 잡음(b_u)에 포함할 수 있다. 또한 식 (1)은 비선형 방정식이며, 문제 해결의 간소화를 위해 이를 다음과 같은 선형방정식의 형태로 근사화 한다.

$$\rho = \hat{\rho} + hx^T - b_u + w \quad (2)$$

여기서 $\hat{\rho}$ 은 $\sqrt{(x_t - \hat{x}_u)^2 + (y_t - \hat{y}_u)^2 + (z_t - \hat{z}_u)^2}$, h 는 $\left[\frac{x_t - \hat{x}_u}{\hat{\rho}}, \frac{y_t - \hat{y}_u}{\hat{\rho}}, \frac{z_t - \hat{z}_u}{\hat{\rho}} \right]$, x^T 는 $[\delta x_u, \delta y_u, \delta z_u]^T = [x_u - \hat{x}_u, y_u - \hat{y}_u, z_u - \hat{z}_u]^T$ 을 나타내며 측정치 잡음 w 는 $w \sim N(0, R)$ 이다.

비선형 방정식의 해인 x_u, y_u, z_u 를 직접 구하기 어렵기에 $\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u$ 과 같이 임의의 초기값을 시작으로 알고리즘이 반복 수행되는 동안 계속해서 갱신되는 위치추정값을 정의한다. $\hat{\rho}$ 은 오차를 포함하는 추정거리가 되며, 이 오차를 반영하기 위해 실제 위치 좌표(x_u, y_u, z_u)와 추정값($\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u$)의 차이를 hx^T 로 반영한다. 따라서 식 (2)는 식 (3)과 같이 송신단말로 부터의 실제 거리와 추정 거리 사이의 차분치가 위치 차분치에 시간 바이어스의 차분치가 추가된 형태로 재정의될 수 있다.

$$\delta\rho = \rho - \hat{\rho} + \hat{b}_u = hx^T - \delta b_u + w \quad (3)$$

식 (3)을 기본으로 다음과 같은 Expanded Kalman Filter(EKF)의 기본 모델식을 정의한다.

$$\begin{aligned} X_{k+1} &= \Phi_k X_k + w_k \\ Z_k &= H_k X_k + v_k \end{aligned} \quad (4)$$

EKF의 상태벡터 X 는 식 (3)의 x^T 에 시간 오프셋 δb_u 와 시간 드리프트 오프셋, 속도, 가속도의 차분 측정치를 포함하여 다음과 같이 정의된다.

$$X^T = [\delta b_u, \delta \dot{b}_u, \delta x_u, \delta y_u, \delta z_u, \delta \dot{x}_u, \delta \dot{y}_u, \delta \dot{z}_u, \delta \ddot{x}_u, \delta \ddot{y}_u, \delta \ddot{z}_u] \quad (5)$$

Z 는 측정치의 차분값이고 v 는 측정치 오차이다. 따라서 식 (4)의 아래식은 식 (3)을 그대로 반영한 것이며, 식 (4)의 윗식은 Φ 가 transition 행렬로 시간에 대한 추정위치값의 갱신을 의미한다. w 는 processing 오차이다. EKF는 시간에 따른 상태벡터의 업데이트(식 (4)의 윗식)와 측정치에 따른 상태벡터의 업데이트(식 (4)의 아랫식)를 서로 연계하여 반복적으로 동작시킴으로써 위치추정값을 실제값에 점점 접근시킨다. EKF 알고리즘에 대한 보다 구체적인 내용은 Fig. 2를 통해 알 수 있다.

실제 TDMA 네트워크 상에서 앞서 설명한 알고리즘이 수행되는 과정은 Fig. 3과 같다. S1~5는 PPLI 메시징 내 자신의 위치정보와 위치품질을 포함하여 전송하는 source 단말이고, U1은 S1~5로부터 PPLI 메시지를 수신하여 자신의 위치를 추정하는 단말이다. S1부터 순차적으로 PPLI 메시지를 전송하며 U1은 PPLI 수신 시 EKF 알고리즘에서 측정치 업데이트를 수행한다. 또한 측정치 업데이트가 발생하는 동안 U1은 일정 시간간격으로 시간업데이트를 수행한다.

Fig. 2. Procedure of EKF(Expanded Kalman Filter) algorithm

Fig. 3. Algorithm procedure based on TDMA

3. DTDMA 기반 상대항법

2장은 ReNav 알고리즘의 기본 원리이며 실제 운용 시에는 Fig. 4와 같은 절차를 거쳐 알고리즘이 수행된다.

Fig. 4. JTIDS ReNav block diagram

먼저 할당된 시간슬롯을 통해 PPLI 메시지가 송수신되고 수신단말은 GDOP를 반영하여 수신된 위치정보에 대해서 품질테이블을 작성한다. 그리고 자신의 위치품질보다 상위 품질인 위치정보만을 선택하여 항법엔진(Expanded Kalman Filter)의 입력값으로 사용한다. 앞서 설명한 알고리즘의 결과로 나온 추정위치는 GPS, INS와 같은 타 항법정보와 결합-타 항법정보와의 결합은 정확도를 보다 높이기 위한 선택사항임-하여 다시 항법엔진의 추정위치($\hat{x}_u, \hat{y}_u, \hat{z}_u$)에 대입된다. 이와 같은 과정이 재귀적으로 반복되어 추정위치가 특정값 이하로 수렴하면 이를 품질정보와 함께 사용자에게 전달하고 사용자는 자신의 PPLI 메시지를 생성함으로써 위치 추정에 대한 일련의 과정이 마무리된다.

이와 같은 JTIDS ReNav 알고리즘의 기본 구조 안

에서 위치 추정값의 정확도를 향상시키는 방법은 정확한 망동기 유지, 양질의 정보 선택, 그리고 해당 정보의 업데이트(측정치 업데이트) 주기를 단축하는 것이다. 정확한 망동기 유지는 TOA측정치의 오차를 줄이기 위한 것으로 RTT를 이용한 능동적 동기 보정과 PPLI를 이용한 수동적 동기 보정으로 해결할 수 있다. 양질의 정보 선택은 추정단말 입장에서 수동적인 부분이며 GDOP가 개선되는 위치로 단말을 이동시키는 방법이 있다. 마지막으로 측정치 업데이트 주기를 단축함으로써 추정위치 정확도를 크게 향상시킬 수 있는데 이는 기존 JTIDS ReNav의 TDMA 환경에서는 적용이 어려우며, 이에 따라 본 논문에서는 DTDMA (Dynamic TDMA) 환경에서 JTIDS ReNav를 적용하는 방법에 대해 제안한다.

Fig. 5. Procedure of relative navigation based on DTDMA

Fig. 6. Return to original condition and slot occupation of entry terminal

초기 위치 정보가 없는 망가입 단말이 source단말을 선택하여 위치정보를 수신받고 자신의 위치를 추정한 후 프레임 내 특정 슬롯을 할당받아 망의 구성원이

되는 과정은 다음과 같다. 새로운 단말은 망에 가입하기 전 망을 통해 전송되는 정보를 한 주기 이상 수신한다. 이 과정에서 새로운 단말은 미할당 슬롯에 대한 파악 및 GDOP가 반영된 위치품질테이블을 작성한다. 그리고 위치품질이 우수한 상위 네 개 단말(source단말로 선정)에 대한 정보와 자신이 점유할 슬롯번호를 포함시킨 “망가입요청메시지”를 제어슬롯을 통해 전송한다. 망가입요청메시지를 수신한 모든 단말은 메시지 내 source단말을 확인한 후 자신이 해당 단말인 경우 다음 프레임부터 품질테이블에 명시된 순서대로 프레임 내 주어진 시간슬롯 전체를 사용하여 전송한다. 또한 품질테이블의 상위 네 개 단말에 포함되지 않은 단말은 다음 프레임부터 기존 할당슬롯에서의 전송을 중단한다. Fig. 5의 예를 보면, 기존슬롯할당이 단말 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8...(연속되는 단말의 할당)으로 할당되어 있고 품질테이블에서의 상위 네 개 단말이 순서대로 1, 2, 3, 4일 때, 망가입요청메시지가 송수신된 프레임의 다음 프레임(제슬롯할당 구간)부터 1, 2, 3, 4을 제외한 나머지 단말의 슬롯이 회수되고 프레임 내 주어진 시간슬롯 전체에 대해서 1, 2, 3, 4, 1, 2, 3, 4...(1, 2, 3, 4의 반복)...과 같이 1, 2, 3, 4의 슬롯이 반복되며 할당된다.

ANGLE	SPEED	POSITION QUALITY	TIME QUALITY	ALTITUDE	LONGITUDE	LATITUDE	SENDER ID	MESSAGE TYPE
9	9	4	4	15	15	15	7	2

Fig. 7. Example of PPLI Structure

SPARE	SELECTED SOURCE INFO	REQUEST SLOT NUMBER	SENDER ID	MESSAGE TYPE
32	28	11	7	2

Fig. 8. Example of request message for network entry

SPARE	GO BACK	SENDER ID	MESSAGE TYPE
70	1	7	2

Fig. 9. Example of request message for return to original condition

새로운 단말은 상위 품질을 보유한 네 개 단말로부터 위치정보메시지를 수신하고 위치 추정 및 위치품질 계산을 수행한다. 위치품질이 수신단말이 원하는 수준

에 이르면 제어슬롯을 통해 “원상태복귀요청 메시지”를 송신한다. 망에 있는 모든 단말들이 이 메시지를 수신하면 다음 프레임부터 기존 할당된 슬롯을 통해 위치정보메시지 송수신을 수행한다. 새로운 단말은 망가입요청메시지에 기입하였던 슬롯번호를 통해 자신의 위치정보메시지를 송신한다.

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 10. Simulation scenario

제안한 알고리즘의 성능 검증을 위해 Fig. 10의 시나리오 환경을 MATLAB으로 모사하여 시뮬레이션을 수행하였다. 한반도 내에서 위치기준(PR : Position Reference)이 되는 노드 7개(G1~7)를 한 번의 길이가 100km인 정육각형의 꼭지점에 6개(G2~G7), 그리고 정육면체 중심(G1)에 1개씩 배치한다. 망에 새로이 가입하고자 하는 비행노드(A1)는 G1을 시작으로 340m/s (마하1)의 속력으로 1시간동안 8자형 비행을 한다. 이때 A1은 G1~7과 DTDMA기반 무선 네트워크의 통달 가능범위 내 존재한다. G1~7은 GPS, 원자시계와 같은 정밀한 외부시계에 동기화되어 있으며 따라서 위치품질, 시간품질 모두 최상위 품질인 15를 보유한다(품질 설정은 JTIDS ReNav의 설정 적용[1]). A1이 G1~7으로부터 PPLI 메시지를 수신할 때 실제 환경과 유사한 환경을 구성하기 위해 TOA 오차, 측정치 오차 및 시스템 오차들은 실제 환경에 대한 자료를 참고하여 설정하였다. 구체적으로 TOA 오차는 편차가 30m인 가우

시안 분포를 가지는데 이는 통신 웨이브폼의 최소톤 간격인 2.5MHz(5MHz의 절반)를 근거로 하였다. 측정치 오차는 편차가 3.5m로 이와 같은 수치의 산출 근거는 다음과 같다. PPLI 메시지 규격에서 거리를 표현하는 기본 단위인 data mile($= 0.88\text{mile} = 1.8288\text{km}$)은 총 20bit로 표현된다. 이중 9비트가 소수를 표현하기 위해 사용되고 따라서 $1.8288\text{km} * 1/512 = 3.5719\text{m}$ 가 표현 가능한 최소 수치이며 이 이하에 대해서는 오차로 분류한다. 시스템 오차는 [3]에서의 수치를 인용하였다.

Fig. 11. JTIDS waveform - 펄스(6.4μs) 당 5bits를 전송하며, 이 때 5bits는 walsh code와 같은 직교변조에 의해 다시 32chips으로 대역확산 됨. 1chip의 길이는 200ns가 되며, TOA계산 시 웨이브폼이 구분되는 기본 단위는 1/2chip으로 이는 30m($100\text{ns} \times c = 30\text{m}$, c 는 $3 \cdot 10^8\text{m/s}$) 편차가 있을 수 있음을 의미함

시뮬레이션은 먼저 기존 TDMA 기반 JTIDS RelNav을 수행하였고 이어 제안하는 DTDMA 기반 상대항법에 대해 수행하였다.

Fig. 12, 13의 (a)는 A1의 위치 추정 결과이며, (b)는 추정시점에서의 GDOP값으로 source단말들과 A1의 기하학적 위치 관계에 따라 그 값이 변화함을 알 수 있다. (c)는 실제위치와 추정위치 간의 RMS(Root Mean Square) 오차이며, (d)는 원형공산오차(CEP : Circular Error Probability), (e), (f)는 각각 시간에 따른 칼만이득(Kalman Gain), 공분산(Covariance)이다. 칼만이득이 작고 그 변화가 적을수록 관측치 업데이트 시 추정값의 수렴 속도가 증가하게 된다. 또한 공분산이 작을수록 추정치의 정확도(위치품질)가 증가한다.

제안하는 기법의 개선된 성능을 구체적으로 살펴보기 위해 Fig. 14와 같이 Fig. 13, 14의 (a)를 보다 확대

하여 관찰한다. Fig. 14(a)를 보면 추정시작 시점을 기준으로 1→2→3→4 순으로 A1이 이동하는 과정에서

Fig. 12. Results of JTIDS RelNav

Fig. 13. Results of RelNav base on DTDMA

Fig. 14. Performance improvement of RelNav based on DTDMA

Table 1. Performance comparison

		JTIDS RelNav	DTDMA 기반
GDOP		16 ~ 20.5	1 ~ 10
RMS	X축	267.124m	123.351m
	Y축	190.400m	37.621m
CEP		270.785m	92.685m
Kalman Gain	X축	-0.05 ~ +0.05	-0.04 ~ +0.04
	Y축	-0.05 ~ +0.05	-0.05 ~ +0.05
P	X축	0.6수준	0.4수준
	Y축	0.6수준	1수준

붉은 실선의 실제 위치와 청색의 추정위치 간의 오차가 1→2 구간을 통과하면서 점차 감소하다가 다시 출발점을 지나 구간 3(사각형 표시 구간)을 지나면서 증가함을 알 수 있다. 이는 출발점 위치 부근에서 source 노드와 A1의 GDOP이 열화되기 때문이다. 반면 제안하는 기법의 결과(Fig. 14(b))를 보면 JTIDS RelNav의 성능열화구간(구간 3)과 비교할 때 오차가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 이는 GDOP관점에서 A1과 기하학적 위치가 좋지 않은 G1, G3, G6가 상대적으로 낮은 위치품질 값을 갖게 됨으로써 전송 기회를 상실하여 PPLI 메시지를 미송신하기 때문이다. Table 1에서의 GDOP 결과가 이를 뒷받침하며, 결과적으로 RMS오차 비교에서도 제안기법의 성능이 크게 향상됨을 알 수 있다. 참고로 RMS오차의 절대값만을 확인하였을 때 GPS, INS와 같은 타항법장비의 성능 수준에 못미치는 듯 보이지만 Fig. 4에서와 같이 상대항법의 실제 운용

은 외부항법자료와 연동을 통해 이루어지며 따라서 보다 정밀한 위치추정을 가능하게 하는 역할을 한다. 외부항법자료 없이 상대항법 단독 운용을 위해서는 사용대역폭의 확장 및 본 논문에서의 제안 기법과 같이 정확도 향상을 위한 별도의 조치가 필요하다.

5. 결론

본 논문에서는 기존 JTIDS RelNav에 DTDMA 적용시 초기 망가입 단말의 위치추정정확도가 향상됨을 분석하였다. 이는 기존 항법시스템의 기능과 성능은 유지한 채 통신시스템에서의 MAC(Medium Access Control) 계층의 자원 관리 효율성을 극대화함으로써 별도의 하드웨어적 개량 없이 항법의 성능이 개선됨을 확인한 것이다. 현재 미국 등 선진국에서는 DTDMA를 MANET(Mobile Adhoc Network)의 MAC기술로 사용하기 위한 연구를 활발히 진행 중에 있으며 JTIDS RelNav가 MANET과 같은 분산형 네트워크 구조에서의 항법시스템임을 생각하면 DTDMA-MANET-상대항법의 연구가 유기적으로 이루어질 필요성이 있다.

References

- [1] Myron Kayton, Walter R. Fried, "Avionics Navigation Systems", Wiley-Interscience.
- [2] W. R. Fried "Principles and Simulation of JTIDS Relative Navigation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronics Systems, Vol. AES-14, Jan. 1978.
- [3] Robert Grover Brown, Patrick Y. C. Hwang, "Introduction to Random Signals and Applied Kalman Filtering", John Wiley & Sons.
- [4] E. W. Kamen and J. K. Su, "Introduction to Optimal Estimation", Springer.
- [5] David Young, "A Unifying Dynamic Distributed Multichannel TDMA Slot Assignment Protocol", Proc. IEEE MILCOM, Vol. 1, Oct. 1996.
- [6] 서난술, 장진상 외, "Link16 RelNav 기반 상대항법 알고리즘 연구", 국방과학연구소 기술보고서, 2009.
- [7] 서난술, 장진상 외, "전술데이터링크 기반 상대항법 시뮬레이터 설계 보고서", 국방과학연구소 기술보고서, 2009.