

반송파위상 GPS를 위한 빠른 미지정수 결정 기법 및 성능분석

Fast Ambiguity Determination Method(FADM) for Carrier Phase GPS and Performance Analysis

최규일, 오민석, 심덕선
(Gyu-Il Choi, Min-Seok Oh, and Duk-Sun Shim)

Abstract : It is well-known that positioning accuracy can be improved by the use of carrier phase of GPS up to the centimeter level. In order to obtain good accuracy, we need to know integer ambiguity in the carrier phase accurately. In this paper, we propose a fast ambiguity determination method (FADM) which combines Kalman filtering and the search method, and show the improvement of the positioning performance by static and kinematic simulation compared with known methods such as Kalman filtering, LSAST(Least Squares Ambiguity Search Technique), ARCE(Ambiguity Resolution with Constraint Equation), LLL(Lenstra, Lenstra, and Lovasz) algorithms.

Keywords : GPS, integer ambiguity, carrier phase

I. 서론

GPS(Global Positioning System)를 사용하여 위치를 측정할 때 C/A코드를 사용하는 것보다 반송파 위상을 측정하면 상당히 정확한 위치를 구할 수 있다. 이중 차분된 반송파 위상을 사용하는 경우 수 km 이내에서는 공통오차가 완전히 상쇄되어 수 cm 정도의 정확도를 갖는 위치측정이 가능하다. 즉 반송파 위상을 사용하면 알고 있는 기준점으로부터 구하고자 하는 안테나의 위치를 수 cm의 정확도로 알 수 있다. 그러나 반송파 위상 신호로부터 위치 또는 자세에 관한 정보를 얻기 위해서는 반송파 위상 신호중의 미지정수가 반드시 결정되어야 한다. 또 이동중에는 건물이나 장애물에 의해 순간적으로 수신기가 위성을 놓치는 사이클 슬립(cycle slip)현상이 일어나므로 미지정수를 빠르게 결정해야 할 필요성이 대두된다.

이 미지정수를 결정하는 방법은 초기에는 여러 epoch의 측정치를 모아서 실수 영역에서의 미지정수와 위치를 구하고, 공분산 정보를 이용하여 정해진 범위를 검색하는 정수 최소자승법(integer least squares method)에 근거를 둔 기법이 주로 사용되었다. 공분산 정보를 이용하여 검색 범위를 줄이는 FARA(Fast Ambiguity Resolution Approach)와 공분산 행렬을 변환하여 계산량을 줄이는 LAMBDA(Least squares AMBiguity Decorrelation Adjustment)[1], Euler와 Landau의 방법 등이 사용되었으며, 요즘은 주로 미지정수가 존재하는 영역에서의 검색(searching) 기법[2][3]이 주로 이용된다. 그 중 LSAST(Least Squares Ambiguity Search Technique)[2]는 현재 가장 많이 널리 사용되는 방법이며, 가장 큰 특징은 위

성을 주(primary)위성과 부(secondary)위성으로 분류하여 사용하는 데 있다. 즉 주위성에 대한 미지정수가 구해지면 위치를 구할 수 있고 위치가 구해지면 부위성의 미지정수를 구할 수 있다. 즉 잉여의 위성정보를 이용하여 미지정수를 결정하는 방법이다. ARCE(Ambiguity Resolution with Constraint Equation)[10]의 경우 LSAST와 유사한 구조로 되어 있지만 위치 계산 없이도 미지정수를 검색할 수 있어 계산상에 이점을 가진다. 하지만 이러한 검색 기법의 경우 미지정수 결정 문제는 정수 제약 조건으로 인하여 많은 문제점을 야기한다.

이와는 달리 칼만 필터(Kalman filter)를 이용한 방법은 엄격히 구분하여 검색기법과는 구별된다. 즉, 칼만 필터를 이용하면 미지정수가 필터의 상태변수가 되어 이를 추정하게 된다. 하지만 이 방법도 미지정수의 수렴속도가 늦어 미지정수 결정에 많은 시간이 소요되는 단점이 있다.

칼만 필터와 검색을 결합하려는 시도는 FASF(Fast Ambiguity Search Filter)[4], LLL(Lenstra, Lenstra, and Lovasz)[6]을 비롯해서 몇 차례 있었지만[5][6] 모두 3개의 미지정수항만 독립이라는 사실을 사용하지 않았으며 위성순서도 PDOP 등을 사용해서 계산량이 상대적으로 양각을 이용한 방법보다 많다. 또 칼만 필터에서 검색으로 전환 시에 정확한 기준이 제시되지 않았다[4]-[6].

본 논문에서는 위에서 언급된 칼만 필터, 여러 가지 검색 기법 및 칼만 필터와 검색을 결합한 방법의 단점을 보완한 빠른 미지정수 결정기법을 제시하고 이 방법을 통한 정밀 위치 결정을 수행하고자 한다.

II. GPS 측정치

기준국(A)과 사용자(B)간의 이중 차분한 의사거리와 반송파 측정치가 측정 방정식에 이용된다. 수신기 A 와 B에서 위성 i 와 j 로부터의 측정치를 수신기간 차분과 위성간 차분을 취함으로써 다음의 이중 차분된 반송파를 위상을 얻는다.

접수일자 : 2001. 2. 26., 수정완료 : 2001. 7. 27.

최규일, 오민석, 심덕선 : 중앙대학교 전자전기공학부(dshim@cau.ac.kr)

※ 본 논문은 1998년도 중앙대학교 학술 연구비와 2000년도 정보통신 우수시범학교 지원사업에서 지원하여 연구하였습니다.

$$\begin{aligned} \Phi_{AB}^j &= (\Phi_B^j - \Phi_A^j) - (\Phi_A^i - \Phi_A^j) \\ &\cong r_{AB}^j + \lambda N_{AB}^j + w_{AB}^j \end{aligned} \quad (1)$$

(1)은 수신기의 위치와 초기의 미지정수를 변수로 포함하고 있으며, 수신기의 위치에 대해서는 비선형 함수가 되므로 이를 임의의 초기값인 $B_0(x_0, y_0, z_0)$ 에 대해 선형화하면 다음과 같다.

$$\Phi_{AB}^j \cong r_{AB_0}^j + h_{B_0}^j T \delta x + \lambda N_{AB}^j + w_{AB}^j \quad (2)$$

여기서,

$$\begin{aligned} h_{B_0}^j &= h_{B_0}^j - h_{B_0}^i \\ &= \begin{bmatrix} -\frac{x^j - x_{B_0}}{r_{B_0}^j} + \frac{x^i - x_{B_0}}{r_{B_0}^i} \\ -\frac{y^j - y_{B_0}}{r_{B_0}^j} + \frac{y^i - y_{B_0}}{r_{B_0}^i} \\ -\frac{z^j - z_{B_0}}{r_{B_0}^j} + \frac{z^i - z_{B_0}}{r_{B_0}^i} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\delta x = [dx \ dy \ dz]^T$$

$[x_0, y_0, z_0]$: nominal point 위치

$[x^i, y^i, z^i]$: 위성의 위치

$r_{B_0}^i$: nominal point와 위성 i 사이의 실제 거리

$r_{AB_0}^j$ 를 좌변으로 옮기면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$l^j = h_{B_0}^j T \delta x + \lambda N_{AB}^j + w_{AB}^j \quad (3)$$

여기서, $l^j = \Phi_{AB}^j - r_{AB_0}^j$ 이다. (3)을 벡터 형태로 나타내면 다음과 같다.

$$l = H\delta x + \lambda N + w \quad (4)$$

여기서 각 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} l &= [l_{AB}^{12} \ \dots \ l_{AB}^{(m-1)m}]^T \\ H &= [h_{B_0}^{12} \ \dots \ h_{B_0}^{(m-1)m}]^T \\ N &= [N_{AB}^{12} \ \dots \ N_{AB}^{(m-1)m}]^T \\ w &= [w_{AB}^{12} \ \dots \ w_{AB}^{(m-1)m}]^T \end{aligned}$$

위의 반송파 위상과 같은 방법으로 의사거리를 이중 차분한 후 선형화 하여 다음과 같은 이중 차분된 식을 얻을 수 있다.

$$p_{AB}^j = r_{AB_0}^j + h_{B_0}^j T \delta x + v_{AB}^j \quad (5)$$

$r_{AB_0}^j$ 를 좌변으로 옮기고 벡터 형태로 표현하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$\rho = H\delta x + v \quad (6)$$

여기서, 각 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$\rho_{AB}^j = p_{AB}^j - r_{AB_0}^j$$

$$\begin{aligned} \rho &= [\rho_{AB}^{12} \ \dots \ \rho_{AB}^{(m-1)m}]^T \\ v &= [v_{AB}^{12} \ \dots \ v_{AB}^{(m-1)m}]^T \end{aligned}$$

III. 빠른 미지정수 결정 방법

본 장에서는 칼만 필터링과 검색기법을 결합하여 빠른 미지정수 결정 기법을 제안한다.

1. 칼만 필터를 위한 동적 방정식

기준국과 사용자가 m 개의 공통 가시위성을 확보했다고 가정할 때, 위치오차, 속도오차, 이중 차분된 미지정수 중 독립인 3개를 상태 변수로 하는 시스템식을 구성하면 다음과 같이 3차의 차분식을 얻을 수 있다.

$$x_{k+1} = \Phi_k x_k + w_k \quad (7)$$

여기서,

$$x_k = [\delta x \ \delta y \ \delta z \ \delta \dot{x} \ \delta \dot{y} \ \delta \dot{z} \ N_1 \ N_2 \ N_3]$$

$$\Phi_k = \begin{bmatrix} I_{3 \times 3} & I_{3 \times 3} \cdot \Delta t & O \\ O & I_{3 \times 3} & O \\ O & O & I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

$$w_k \sim N(0, Q_k)$$

이다. 여기서 w_k 는 기대치가 0이고, 스펙트럼 밀도가 Q_k 인 백색 가우시안 프로세스이고 Q_k 는 아래와 같다.

$$Q_k = E\{w_k w_k^T\} = \begin{bmatrix} \frac{q_x \Delta t^3}{3} \cdot I_{3 \times 3} & \frac{q_x \Delta t^2}{2} \cdot I_{3 \times 3} & O \\ \frac{q_x \Delta t^2}{2} \cdot I_{3 \times 3} & q_x \Delta t \cdot I_{3 \times 3} & O \\ O & O & q_N \cdot I_{3 \times 3} \end{bmatrix}$$

2. 칼만 필터를 위한 측정식

II장에서 구한 이중 차분된 의사거리 ρ 와 반송파 위상 측정치 l 를 이용하여 (4)와 (6)으로 측정식을 구성하면 다음과 같다.

$$z_k = H_k x_k + v_k \quad (8)$$

여기서,

$$z_k = [l \ \rho]^T$$

$$H_k = \begin{bmatrix} H & O & \lambda \cdot I_{3 \times 3} \\ H & O & O \end{bmatrix}$$

$$v_k \sim N(0, R_k)$$

이다. 위에서 R_k 는 측정 잡음의 스펙트럼 밀도이고, 이는 다음과 같다.

$$R_k = E\{v_k v_k^T\} = \begin{bmatrix} \sigma_\rho^2 DD \cdot DD^T & O \\ O & \sigma_l^2 DD \cdot DD^T \end{bmatrix}$$

$$DD = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & -1 & 1 \end{bmatrix}$$

3. 빠른 미지정수 결정 알고리즘

본 논문에서는 미지정수의 검색범위를 줄이기 위해 칼만 필터를 사용하여 초기 검색범위를 줄인 후 검색하는 방법을 사용하였다. 미지정수 검색에 의한 미지정수 추정기법에서

는 실수 영역에서 추정된 미지정수 초기치가 참값에 가깝게 추정될수록 더욱 안정적이고 빠른 위치 수렴성을 보장할 수 있다. 초기치의 정확도가 높을수록 잘못된 미지정수가 결정될 확률이 낮아지고 검색범위도 줄어들기 때문에 칼만 필터를 이용하여 미지정수의 초기치를 추정하면 좀 더 효율적인 미지정수 검색이 가능하다.

칼만 필터와 검색기법을 병행하는 알고리즘은 널리 알려진 방법이다[1][4][5][7]. 이들 방법들은 미지정수항이 3개만이 독립이라는 사실을 이용하지 않았고 위성순서로 PDOP을 사용해서 계산량이 많다. 또 검색 영역을 줄이는 방법에 문제가 있어 참 미지정수가 검색영역에서 제외되어 참 미지정수를 측정하지 못하는 경우가 많다. 본 연구에서는 검색소요시간을 단축하고 참 미지정수를 추정하는 성공률을 높이는 알고리즘을 제안한다.

제안하는 미지정수 결정과정

i) 먼저 양각을 이용해서 위성의 순서를 결정하고 이 순서에 따라 독립 미지정수항과 종속 미지정수항으로 나눈다. 양각을 이용한 방법은 양각이 큰 순서대로 결정하는 방법(방법 1)과 양각이 가장 큰 위성을 1번 위성으로 하고 그 위성으로 거리가 가장 먼 위성을 2번 또, 앞에 두 위성으로부터 거리가 가장 먼 위성을 3번, 이런 방법(방법 2)으로 위성 순서를 결정한다.

ii) 칼만 필터를 이용하여 위치오차와 미지정수를 추정한다.

iii) 검색은 독립 미지정수항에 대해서만 이루어진다. 초기치는 칼만 필터에서 N에 대한 P 행렬의 1σ 값의 변화량이 0.01이하가 되면 그때의 N값으로 한다. 1σ의 값의 변화량이 0.01이 될 때까지 칼만필터를 돌리는 것은 1σ값이 빠르게 감소하다가 어느 정도 지나면 변화량이 둔화되는데 이때 필터링에서 검색으로 전환하기 위한 것이다. 0.01은 파라미터로 볼 수 있다. 검색범위는 다음과 같이 (9)로 잡는다.

$$\hat{N}_i - \delta N_i \leq \hat{N}_i \leq \hat{N}_i + \delta N_i \quad (9)$$

여기서,

$$i=1, 2, 3$$

$\delta N_i = \beta \frac{2}{\lambda} \sqrt{\sigma_b^2 + \sigma_\theta^2}$ 이고, β는 significant level, σ_b 는 코드 측정잡음의 표준편차, 그리고 σ_θ 는 위상 측정잡음의 표준편차이다.

iv) 검색기법에서는 다음과 같은 목적함수를 최소화하는 미지정수 N을 찾는다.

$$Q = \frac{(I - H\hat{\delta}x - \lambda N)^T Q^{-1} (I - H\hat{\delta}x - \lambda N)}{m - 4} \quad (10)$$

v) 임계치를 사용하여 계산된 목적함수가 임계치보다 크면 해당되는 미지정수 후보를 검색대상에서 제외한다. 최종적으로 한 개의 미지정수 후보만 남으면 이를 참 미지정수로 고정한다. 그러나 여러 개의 미지정수 후보가 계속 남아 있을 수 있으며 이런 경우 비울검사를 실시한다. 하지만 이를 통과하지 못하더라도 목적함수를 최소화하는 N이 3 epoch 이상 반복되면 이를 최종 미지정수로 결정한다. 이는 실제

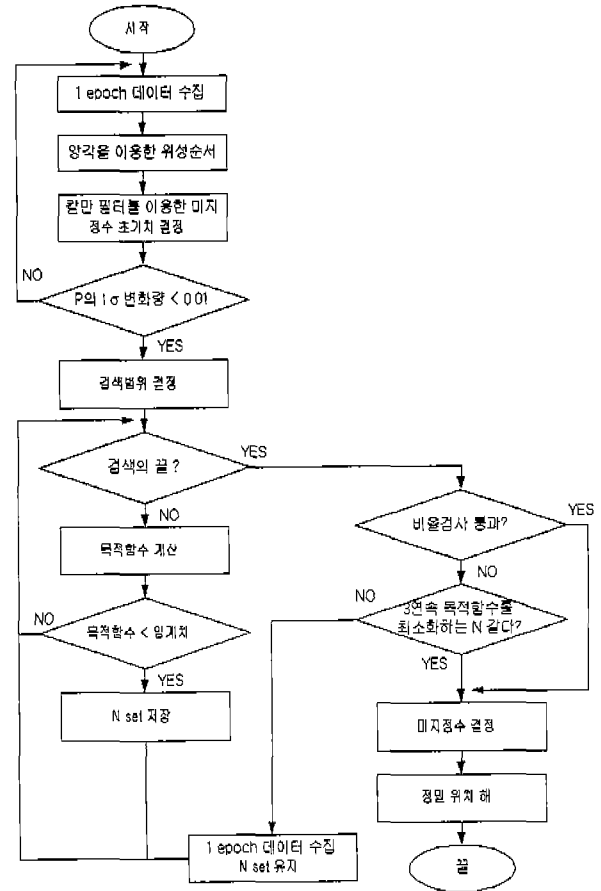


그림 1. 칼만 필터와 검색에 의한 방법을 이용한 정밀 측위. Fig. 1. Precise positioning flowchart using kalman filter and search method.

로 목적함수를 최소화하는 N 값이 참값으로 일정하게 유지되어도 측정잡음의 영향으로 비울검사를 통과하지 못해 검색시간이 길어지는 것을 방지하기 위해서다.

위의 순서를 그림으로 표시하면 그림 1과 같다.

IV. 정적 및 동적 시뮬레이션

본 장에서는 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 제안한 기법(앞으로는 FADM(fast ambiguity determination method)의 성능을 검증하였으며 칼만 필터, LSAST[2], ARCE[3], 그리고 LLL[7]의 알고리즘과 성능비교 하였다. GPS의 위성 배열 및 오차 생성을 위하여 GPSof에서 제작한 Matlab용 Satellite Navigation TOOLBOX를 이용하였다.

항법 시스템의 실험 결과에서는 실제 궤적과 항법 결과 추정된 궤적과의 오차가 요점이 되며 이를 각 알고리즘별로 정적 시뮬레이션과 동적 시뮬레이션으로 나누어 표와 그래프로 나타내어 분석하였다. 또 알고리즘 중 검색기법의 경우 검색시간과 성공률을 표로 만들어 비교하였으며 칼만 필터와 검색에 의한 방법의 경우 양각, NDOP, PDOP에 의한 위성순서에 따른 오차를 분석하였다. 좌표계는 ENU(East-North-Up)좌표계를 사용하였다.

NDOP은 [3]에서 사용한 것으로 종속 미지정수 항의 추정치의 분산을 나타내며 [3]에서는 NDOP를 최소화하는 위성

의 조합을 구하는데 사용하였다.

1. 정적 시뮬레이션

정적시뮬레이션의 경우 기준점으로부터 북쪽으로 100m 떨어져있는 고정된 수신기에서 1초 간격으로 위성 데이터를 수신하는 것을 가정하였으며 오차항을 달리하며 32번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다.

먼저 표 1은 빠른 미지정수 추정 방법에서 NDOP, PDOP 그리고 3.2.1에서 언급한 앙각에 의한 방법 1,2에 따라 위성 순서를 달리했을 때 각각의 위치오차를 비교한 것이다. 여기서 앙각을 이용한 위성순서 결정방법이 NDOP나 PDOP을 이용한 방법에 비해 비슷하거나 나은 결과를 보여주고 있다. 따라서 계산량과 메모리 사용량에 감소에 비중을 두는 시스템의 경우 앙각을 이용한 위성 배열도 고려해 볼 필요성이 있다.

표 2는 칼만 필터를 제외한 검색 알고리즘인 LSAST, ARCE, LLL, 그리고 제안한 방법인 FADM의 검색소요시간과 성공률에 관한 표이다. 제안된 알고리즘은 검색소요시간의 경우 LSAST와는 비슷한 성능을 보이고 있지만 ARCE와 LLL에 비해서는 월등한 성능을 보이고 평균 5.77epoch 만에 미지정수를 추정할 수 있었으며 성공률의 경우 32번의 수행 중 30번의 높은 성공률을 보이고 있다. 이는 칼만 필터로 미지정수 초기치의 검색 범위를 줄이고 비율 검사를 보완하는 방법을 사용함으로써 참 미지정수가 제거되는 문제를 해결했기 때문이다.

그림 2부터 그림 6은 칼만 필터, LSAST, ARCE, LLL, 그리고 빠른 미지정수 추정 방법의 수평위치와 수직위치이고 표 3은 각 알고리즘의 위치 오차를 나타내고 있다. 각 그림에서 도시한 위치 성분은 기준점에 대해 ENU 관성 좌표계로 변환한 것으로 사용자의 실제 위치는 동쪽으로는 0m, 북쪽은 100m, Up축은 0m인 지점이다. 표 3으로부터 미지정수를 이용한 방법이 모두 대략 수 cm 수준의 위치 정확도를 유

표 1. 앙각, NDOP, PDOP을 이용한 위성순서 따른 위치 오차 - 빠른 미지정수 추정 방법(단위 : m).

Table 1. Positioning error with respect to elevation angle, NDOP, PDOP-FADM(proposed method).

	수평 오차(RMS)		수직 오차(RMS)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
앙각(방법1)	0.0107	0.0071	0.0624	0.0522
앙각(방법2)	0.0116	0.0078	0.0547	0.0663
NDOP	0.0132	0.0096	0.0704	0.0843
PDOP	0.0264	0.0192	0.0865	0.0863

표 2. 미지정수 검색 결과(정적 시뮬레이션).

Table 2. Integer ambiguity research result(static simulation).

	검색 소요시간 (epoch)	성공회수	실패회수	성공률 (%)
LSAST	6.20	26	6	81.25%
ARCE	16.94	18	14	56.25%
LLL	33.53	17	15	53.13%
FADM(제안한 방법)	5.77	30	2	93.75%

지함을 알 수 있으며 제안된 알고리즘의 경우 수평축에 경우 LSAST에 비해서는 약 2배, 다른 알고리즘에 비해서는 3 배 이상 나은 성능을 보임을 알 수 있다.

2. 동적 시뮬레이션

실시간 동적 환경에서도 제안된 알고리즘이 물체의 위치를 정지측량에서처럼 제대로 추정하는지를 검증하기 위해 동적 시뮬레이션을 수행하였다. 동적 시뮬레이션의 경우 기준점으로부터 Up축으로는 0m인 수평한 반지름 25m인 원을 실험 1은 2000초동안, 실험2는 1000초동안 한 바퀴를 도는 등속원운동을 하며 1초 간격으로 위성 데이터를 수신하는 것을 가정하였으며 오차항을 달리하며 각각 몬테카를로 시

표 3. 100m 기저선 시뮬레이션에 대한 위치 오차(단위 : m). Table 3. Position error with respect to 100m baseline simulation(m).

	수평 오차 (RMS)		수직 오차 (RMS)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
칼만 필터	0.0320	0.1049	0.1169	0.2819
LSAST	0.0196	0.0117	0.0653	0.0574
ARCE	0.0328	0.0704	0.0760	0.1521
LLL	0.0442	0.1172	0.1695	0.3936
FADM(제안한 방법)	0.0107	0.0071	0.0624	0.0522

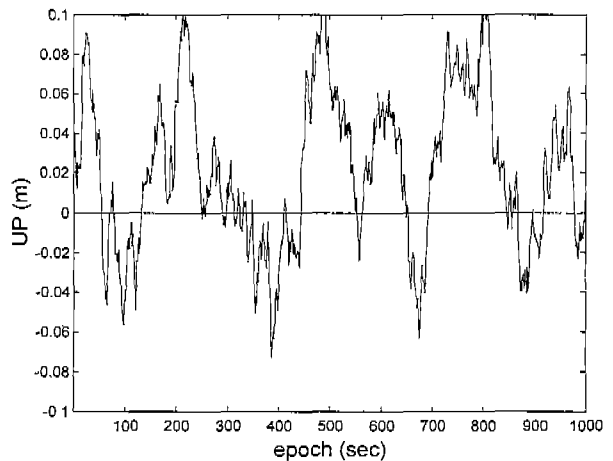
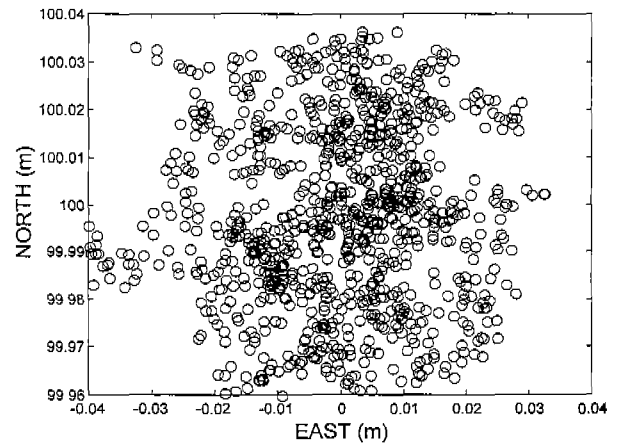


그림 2. 수평 및 수직위치 추정값(칼만 필터).

Fig. 2. Estimate value of horizontal and vertical position(kalman filter).

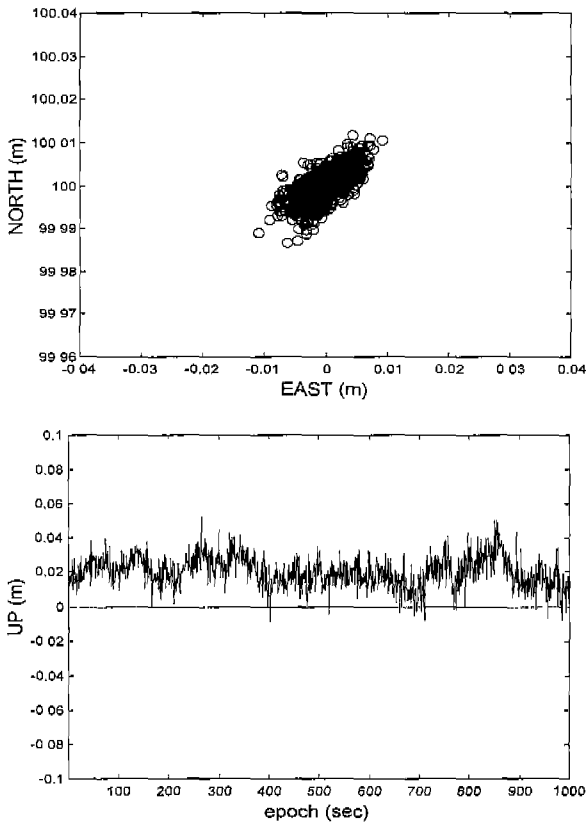


그림 3. 수평 및 수직위치 추정값(LSAST).
Fig. 3. Estimate value of horizontal and vertical position(LSAST).

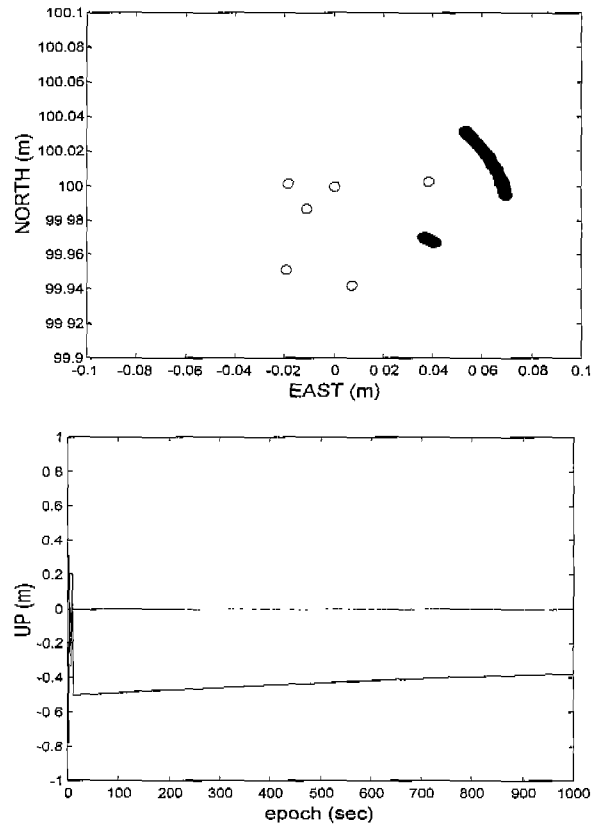


그림 5. 수평 및 수직위치(LL).
Fig. 5. Estimate value of horizontal and vertical position(LL).

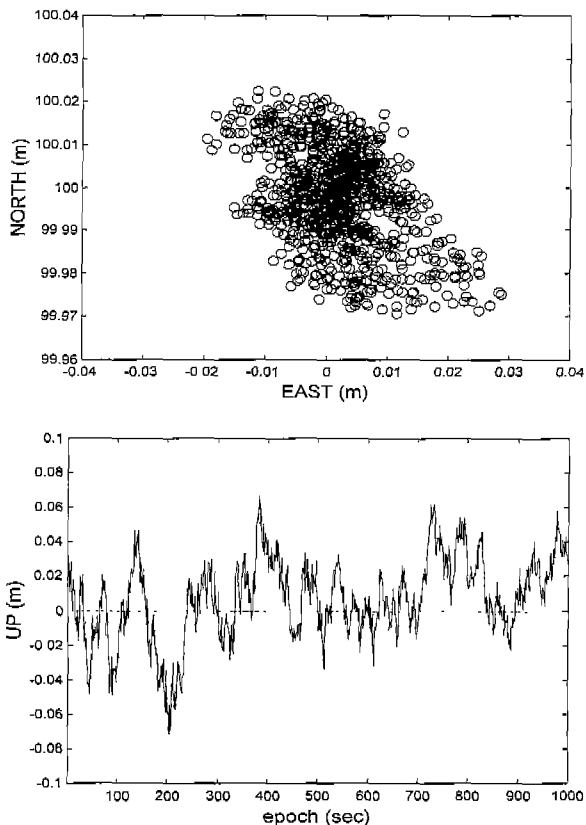


그림 4. 수평 및 수직위치(ARCE).
Fig. 4. Estimate value of horizontal and vertical position(ARCE).

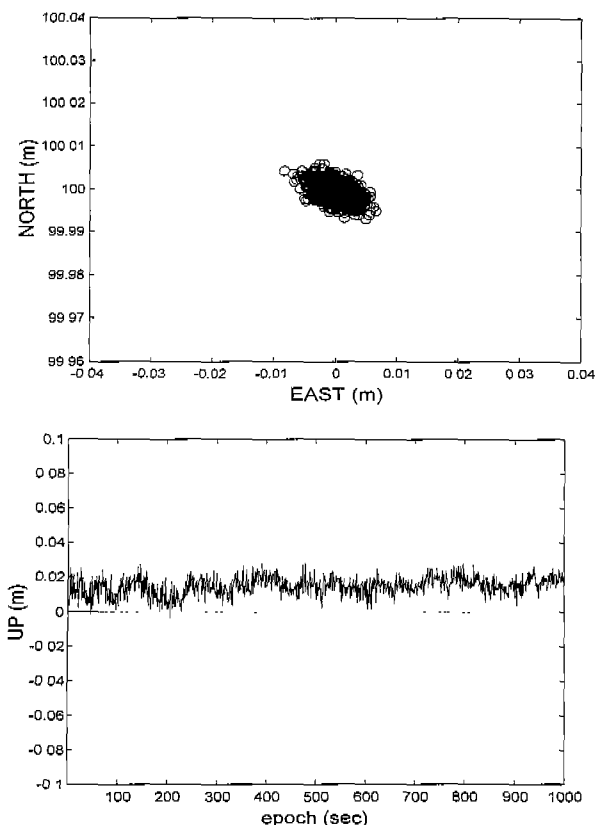


그림 6. 수평 및 수직위치(FADM(제한한 방법)).
Fig. 6. Estimate value of horizontal and vertical position(FADM).

플레이션을 32번 수행하였다

표 4, 표 5는 동적 시뮬레이션에서 칼만 필터를 제외한 검색 알고리즘의 검색소요시간과 성공률에 관한 표이다. 정적 시뮬레이션에 비해 검색소요시간이 모두 증가하였고 성공률도 모두 떨어졌음을 알 수 있다. LSAST의 경우 속도가 증가함에 따라 그 성능이 많이 떨어졌음을 알 수 있다. ARCE는 검색소요시간에 큰 변화가 없지만 정적 시뮬레이션에서와 마찬가지로 성공률이 너무 낮은 문제가 있으며 LLL은 정적, 동적 모두 가장 나쁜 성능을 보였다. 이는 미지정수 결정을 위한 검색과정에 검색영역에 정수가 존재하지 않아 다시 데이터를 받는 경우가 빈번하기 때문이다. 제안된 알고리즘은 정적 시뮬레이션에서와 마찬가지로 다른 알고리즘과 비교하여 가장 나은 성능을 보였다.

그림 7부터 그림 11은 실험 2에서 각 알고리즘의 수평 위치와 수직 위치를 나타낸 것이다. 그림 7과 그림 11을 통해 수평면에 대해서는 칼만 필터의 경우와 제안한 방법인 FADM의 경우 이동측위를 비교적 정확하게 수행하였음을 알 수 있다. 각 알고리즘에 위치 오차를 분석한 표 4-6과 표 4-7을 보면 정적 시뮬레이션에 비해 전반적인 오차의 증가에도 불구하고 제안된 알고리즘의 경우 cm 수준의 위치 정확도를 유지하고 있음을 알 수 있다. 또, 실험 2의 경우 비교적 동적 환경에서 위치추정이 잘 이루어지고 있는 칼만 필터와 비교해서도 비슷한 정도의 수평 오차를 가지고 있지만 수직 오차에서는 3배 이상의 위치 정확도를 가지며 다른 검색기법에 비해서는 수직, 수평 오차 모두 월등한 위치 정확

도를 보여 주고 있다.

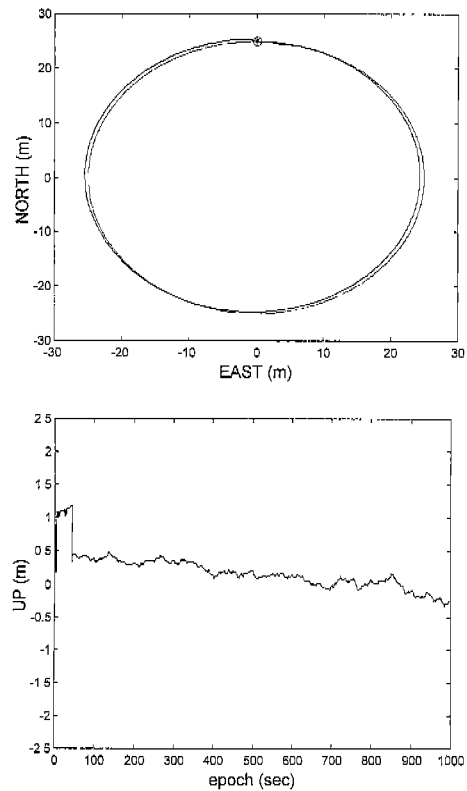


그림 8. 수평 및 수직위치 추정치(LSAST).
Fig. 8. Estimate value of horizontal and vertical position(LSAST).

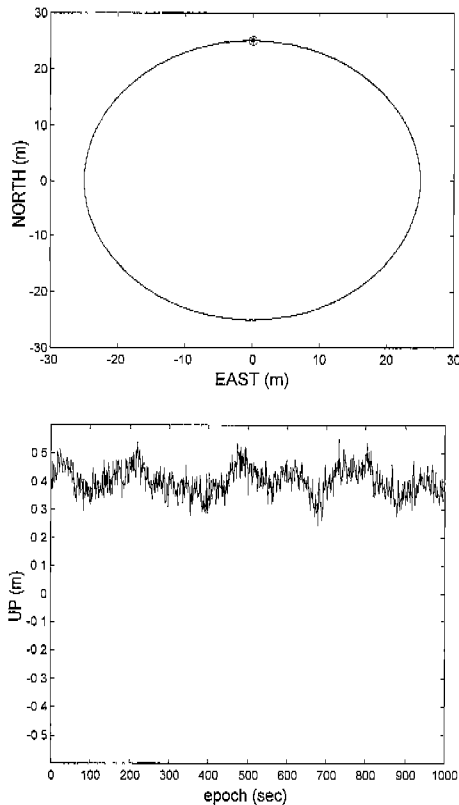


그림 7. 수평 및 수직위치 추정치(칼만필터).
Fig. 7. Estimate value of horizontal and vertical position(kalman filter).

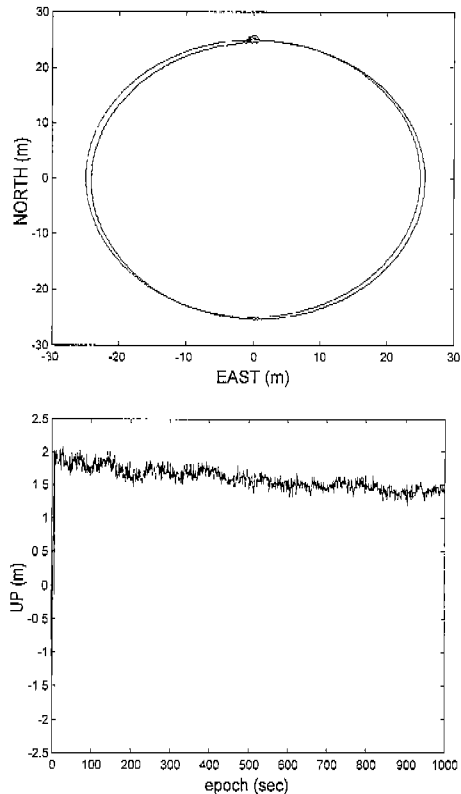


그림 9. 수평 및 수직위치 추정치(ARCE).
Fig. 9. Estimate value of horizontal and vertical position(ARCE).

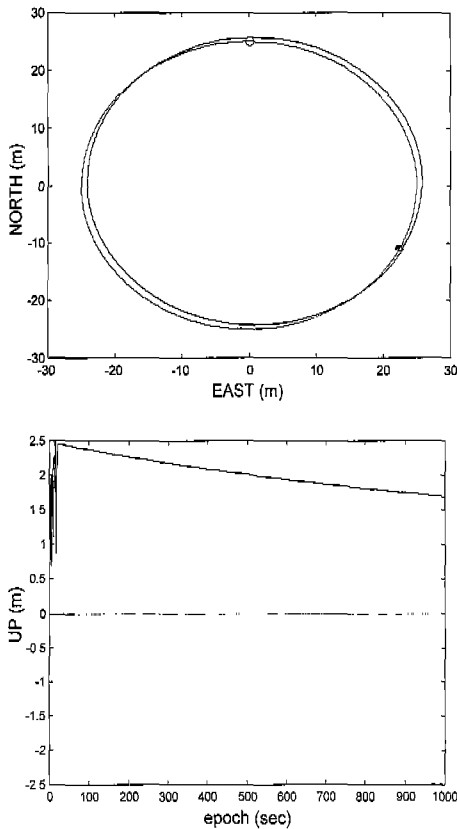


그림 10. 수평 및 수직위치 추정치(LLL).
Fig. 10. Estimate value of horizontal and vertical position(LLL).

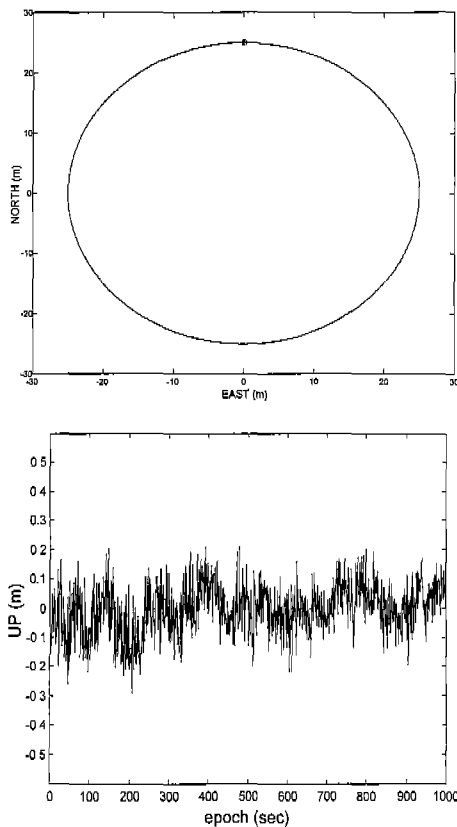


그림 11. 수평 및 수직위치 추정치(FADM, 제안한 방법).
Fig. 11. Estimate value of horizontal and vertical position(FADM).

표 4. 미지정수 검색 결과(동적 시뮬레이션) - 실험 1(2000 초주기 원운동).

Table 4. Integer ambiguity search result(kinematic simulation) - experiment 1(circular motion with period 2000 seconds).

	검색 소요시간 (epoch)	성공회수	실패회수	성공률 (%)
LSAST	11.38	29	3	90.63%
ARCE	18.50	17	15	53.13%
LLL	52.87	15	17	46.88%
FADM(제안한 방법)	7.07	28	4	87.50%

표 5. 미지정수 검색 결과(동적시뮬레이션) - 실험2(1000 초주기 원운동).

Table 5. Integer ambiguity search result (kinematic simulation) - experiment 2(circular motion with period 1000 seconds).

	검색 소요시간 (epoch)	성공회수	실패회수	성공률 (%)
LSAST	23.24	21	11	65.63%
ARCE	17.94	17	15	53.13%
LLL	24.42	12	20	37.50%
FADM(제안한 방법)	10.67	27	5	84.38%

3. 시뮬레이션 결과 고찰

본 연구에서는 미지정수를 빠르고 정확하게 구하는 알고리즘을 구하고자 하였다. 표 2, 4, 5를 보면 제안한 방법이 다른 방법보다 검색소요시간이 짧은 것을 알 수 있었고 성공률도 높음을 알 수 있다. 검색소요시간이 적은 것과 성공률이 높은 것과 관련이 있다고 볼 수 있다. ARCE와 LLL에서 검색소요시간이 길어지는 것은 검색에서 참 미지정수의 참값이 제외되는 경우가 있어서 다시 검색하는 경우가 있기 때문이고 이는 실패 회수와 관련된다. 제안한 방법이 검색소요시간이 짧은 것은 칼만필터링으로 검색범위를 빨리 압축했으며, 비울검사를 통과하지 못하더라도 목적함수를 최소화하는 값이 3번 이상 반복되면 참 미지정수로 고정하며 참값이 검색영역에서 제외되는 것도 막았기 때문이라고 본다. 실제 다른 알고리즘이 경우 비울 검사를 통과하지 못하여 시간이 많이 소요되었다. 표 3, 6, 7을 보면 제안한 방법이 위치 정확도 면에서도 우수한 것을 볼 수 있다. 그림에서 수직위치오차가 바이어스가 있는 것을 볼 수 있는데 이는 GPS

표 6. 등속원운동 시뮬레이션에 의한 위치 오차(단위 : m) - 실험 1.

Table 6. Position error of constant speed circular motion (m) - Experiment 1).

	수평 오차 (RMS)		수직 오차 (RMS)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
칼만 필터	0.0834	0.2270	0.2389	0.5637
LSAST	0.3232	0.5951	0.4398	0.8140
ARCE	0.7371	1.1560	1.2928	2.0370
LLL	0.9406	1.0165	1.8657	1.6458
FADM(제안한 방법)	0.0113	0.0070	0.0659	0.0523

표 7. 등속원운동 시뮬레이션에 의한 위치 오차(단위: m)- 실험 2.

Table 7. Position error of constant speed circular motion (m) - Experiment 2.

	수평 오차 (RMS)		수직 오차 (RMS)	
	평균	표준편차	평균	표준편차
칼만 필터	0.1168	0.2860	0.2841	0.6011
LSAST	0.3567	0.5778	0.3601	0.6335
ARCE	0.9468	1.4143	1.5732	2.2862
LLL	1.1474	0.9762	2.6952	0.9258
FADM(제한한 방법)	0.0956	0.1330	0.0769	0.0534

측정치에 다중경로 오차 등이 포함되어 있어 미지정수가 참값으로 수렴하기 어렵기 때문으로 볼 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 빠른 미지정수 추정 방법을 이용한 미지정수 추정과 이에 따른 위치 결정기법에 대해 연구하였다. 성능을 분석하기 위해 100m 기저선의 정적 시뮬레이션과 기준점으로부터 반지름이 25m인 등속원운동을 하는 동적 시뮬레이션을 수행하였다.

또한 그 성능을 다른 방법과 비교하기 위해 칼만 필터를 이용한 방법, 검색기법인 LSAST, ARCE, LLL을 그 비교대상으로 삼았다. 제안된 알고리즘이 기존의 검색기법과 비교하여 나은 결과를 얻었으며 이는 미지정수의 초기치를 칼만 필터를 통해 실제 미지정수 근처로 옮김으로써 검색시 실제 미지정수값이 제거되거나 혹은 미지정수를 잘못 결정하는 문제를 해결하였기 때문이다. 이와 같은 사실은 각 알고리즘을 비교한 미지정수 검색 성공률에서도 확인할 수 있었다. 또한 칼만 필터를 검색 전에 사용함으로써 미지정수를 결정하는 검색시간도 단축할 수 있었다.

참고문헌

[1] P. J. G. Teunissen, "A new method for fast carrier phase

ambiguity estimation," *Proceedings of IEEE Position Location and Navigation Symposium*, pp. 562-573, 1994.

[2] Hatch, R, "Instantaneous ambiguity resolution," *Proceedings of KIS symposium*, Banff, Canada, 1990.

[3] 박찬식, "GPS 반송파 위성신호를 이용한 자세 결정," 서울대학교 박사학위 논문, 1997.

[4] D. CHEN and G. LACHAPELLE, "A Comparison of the FASF and least-squares search algorithms for on-the-fly ambiguity resolution," *Journal of The Institute of Navigation*, vol. 42, no.1, pp. 371-390, Summer 1995.

[5] 김정환, "GPS 반송파 위상을 이용한 정밀 측위," 서울대학교 석사학위 논문, 1999.

[6] 이영식, 지규인, 이영재, "실수 미지정수를 이용한 항체의 실시간 동적 정밀 위치 결정 기법," *The 7th GNSS Workshop*, pp. 50-53, 2000.

[7] Arash Hassibi and Stephen Boyd, "Integer parameter estimation in Linear models with applications to GPS," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 46, no. 11, pp. 2938-2952, 1998.

[8] Bradford W. Parkinson & James J. Spiker Jr., "Global positioning system theory and applications volume I, *AIAA(American Institute of Astronautics and Aeronautics, Inc.)*, 1996.

[9] Brown, R. G. and Hwang, P. Y. C., "Introduction to random signals and applied Kalman filtering," John Wiley & Sons, 1997.

[10] B. Hofmann-Wellenhof, H. Lichtenegger, and J. Collins "GPS theory and practice," Spring Wien NewYork, 1992.

[11] Elliot D. Kaplan, "Understanding GPS principles and applications," Artech House, 1996.

[12] 최규일, 심덕선, "칼만 필터를 사용한 GPS 위성의 초기 미지정수 추정," 2000년도 제어계측·자동화·로보틱스연구회 합동 학술 발표회 논문집, pp. 206-210, 2000.

[13] 한훈택, 현분필, 지규인, "실수 미지정수를 이용한 정밀 위치결정 기법의 개발 및 성능분석," *Proceeding of the 14th KACC*, 1999.

[14] 김용일, 김동현, "LSAST를 이용한 정밀측위에 관한 연구," 제3차 GPS workshop, pp. 465-475, 1996.



최 규 일
1974년 3월 21일생. 1999년 중앙대 제어계측공학 졸업. 동대학 전자전기공학부 대학원 공학석사(2001). 2001~현재 삼성전자 연구원. 관심분야는 항법유도제어, 무선통신.



오 민 석
1974년 10월 12일생. 2000년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2000~현재 동대학 전자전기공학부 대학원 공학석사(2001). 관심분야는 GPS상관기 설계, VHDL을 이용한 하드웨어 설계.



심 덕 선
1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 1986년 동대학원 졸업(공학석사). 1993년 미시간대 항공우주공학과 졸업(공학박사). 1994년 1월~1995년 1월 미시간대 전기 및 컴퓨터 공학과 Post-doc. 1995년 3월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 부교수. 관심분야는 견실 제어, 관성항법 시스템, GPS, 지능교통시스템 등.