

# 다중경로 환경에서 형상필터를 이용한 CDGPS 성능 향상 기법

논 문
60-12-23

## Improving the Performance of CDGPS using the Shaping Filter on Multipath

조 성 룡\* · 한 영 훈\*\* · 최 현 호\*\*\* · 허 문 범§ · 박 찬 식§§ · 이 상 정†  
(SungLyong Cho · Young Hoon Han · Heon Ho Choi · Moon-Beom Heo ·  
Chansik Park · Sang Jeong Lee)

**Abstract** - The quality of float solution deeply influences the performance of CDGPS because the theories being used in the integer ambiguity resolution method are derived under the assumption of AWGN. But in real world, the properties of noises are far from AWGN, especially when multipath are concerned. It results in the bias in float solution which affects the success rate of integer ambiguity and the precision of position in CDGPS. This paper designs an augmented Kalman filter using shaping filter and Kalman filter for the performance improvement of CDGPS on multipath. The experimental results with real measurements show that the correct integer ambiguity is always found while the success rates of WLSQ and ordinary Kalman filter are 5% and 18%, respectively. Eventually, the position accuracy is also improved by using the proposed algorithm.

**Key Words** : CDGPS, Float solution, Integer ambiguity, Shaping filter, Kalman filter

### 1. 서 론

CDGPS(Carrier phase Differential Global Positioning System)에서는 코드측정치 뿐 아니라 반송파 위상 측정치를 동시에 사용하며, 알고 있는 위치에 고정된 기준국과 이동국에서 동시에 측정된 측정치를 이중차분 기법을 적용하여 공통오차를 제거한 후 기저선(baseline)을 구하는 상대측위기법을 이용한다. 이렇게 구해진 위치해는 mm급의 정확도를 갖는다. 따라서 CDGPS는 측지, 측량분야에서 오랫동안 연구되어 왔으며 최근에는 교량의 진동감시, 댐의 변형감시, 건설 분야로 그 활용범위를 확장해가고 있으며, 항법에서의 적용을 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 반송파 위상 측정치는 높은 해상도로 정밀 측위가 가능하지만, 반송파 위상 측정치를 사용하기 위해서는 반송파 위상 측정치에 포함된 미지정수가 결정되어야 한다. CDGPS는 이중 차분된 코드와 반송파 위상 측정치를 이용하여 실수해와 공분산을 구하고, 이를 이용하여 미지정수를 결정하고, 결정된 미지정수는 최종 위치해를 구하는 3단계로 구성된다[1]. 1단계에서 구한 실수해는 정수의 제약을 제거하고 실수 영역에서 구한

미지정수와 위치를 나타내며, 구해진 실수해의 정확도는 관측 위성 수, 측정치의 정확도, 측정치 수집시간, L1/L2/L5등 사용된 주파수에 의하여 결정된다. 2단계에서 미지정수 결정은 1단계에서 구한 실수해의 기대값과 공분산으로부터 검색 과정을 통하여 미지정수를 결정한다. 검색기법에는 LAMBDA(Least-squares AMBiguity Decorrelation Adjustment) [1], MCAR(Multiple Carrier Ambiguity Resolution)[2], CIR(Cascading Integer Resolution)[3], ARCE(Ambiguity Resolution using Constraint Equation)[4] 등의 기법이 연구되었으며 LAMBDA가 가장 대표적인 기법이다.

CDGPS에서의 미지정수 결정은 항상 성공적으로 이루어지는 것은 아니며, 아직 검색 결과의 진위를 판단할 방법은 없는 실정이다. 미지정수 검색 성공률(success rate)[5]은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 잡음이 존재하는 경우의 미지정수 검색 성공 확률을 나타내며, 실수해의 정확도에 영향을 받는다[6]. 실수해의 정확도를 향상시키기 위한 방법으로는 코드 측정치의 정확도를 향상시키기 위한 협대역 상관기(Narrow Correlator)[7], 반송파 위상 측정치의 정확도를 향상시키기 위한 PLL 추적회로의 향상[8] 등 수신기의 성능 향상에 대한 연구와 Wide-Lane[1] 등 다중 대역의 측정치를 조합하여 과장에 비하여 잡음의 크기를 줄이는 기법 및 최소자승법 대신 칼만 필터[9] 등의 알고리즘을 사용하여 추정치의 정확도를 향상시키는 방법 등이 연구되어 왔다.

미지정수 결정과정 및 성능 향상을 위한 연구는 대부분 측정 잡음이 AWGN임을 가정하고 진행되므로 이 가정이 맞지 않는 측정 잡음의 경우 성능 저해 요인이 된다. 실수해의 기대값에 바이어스가 있는 경우 미지정수 검색 성공률

\* 정 회 원 : 충남대 공과대학 전자공학과 박사과정  
\*\* 준 회 원 : 충남대 공과대학 전자공학과 석사과정  
\*\*\* 정 회 원 : 충남대 공과대학 전자공학과 박사과정  
§ 비 회 원 : 한국항공우주연구원 선임연구원  
§§ 정 회 원 : 충북대 전자정보대학 제어로봇공학과 교수  
† 교신저자, 정회원 : 충남대 공과대학 전자공학과 교수  
E-mail : eesjl@cnu.ac.kr  
접수일자 : 2011년 9월 20일  
최종완료 : 2011년 11월 16일

이 급격히 낮아짐을 보였으며[10], 특히 다중경로가 있는 경우 정밀 위치 결정에 악영향을 미치는 것으로 알려져 있다 [11]. 다중경로를 제거하는 방법으로는 초크링 안테나[12]를 사용하거나, 수신기 내부에서 협대역 상관기(Narrow Correlator), MET(Multipath Elimination Technology)[13], MEDLL(Multipath Estimating Delay-Lock-Loop)[14] 등의 상관기를 사용하거나, 다수의 안테나에서 RHCP(Right Hand Circular Polarization)의 직접파와 LHCP(Left Hand Circular Polarization)인 반사파를 수신하여 제거하는 기법 [15]이 대표적으로 사용된다. 그러나 이들 기법은 위치가 고정된 기준국에서 주로 사용되며, 고가의 수신기를 사용해야 하는 단점이 있다.

본 논문에서는 다중경로가 존재하는 환경에서 다중경로의 특징을 형상 필터(Shaping Filter)로 모사하고 이를 포함하는 확장된 칼만 필터(Augmented Kalman Filter)를 구성하여 실수해를 구하고 그 특성을 확인한다. 즉, 다중경로로 인하여 이중 차분된 코드 측정치 잡음 특성을 모델링하고, 이를 기반으로 형상필터가 추가된 칼만 필터를 구성한다. 형상필터가 추가된 칼만 필터를 실제 수집한 측정치에 적용함으로써 실수해의 오차와 공분산이 작아지고, 이로 인하여 참 미지정수 결정 성공률과 정수해를 이용한 항법 성능이 향상됨을 확인한다. 본 논문에서 제안한 기법은 소프트웨어의 추가만으로 쉽게 적용할 수 있는 장점이 있다.

## 2. CDGPS에서 실수해의 특징

본 논문에서는 일반적으로 사용하는 이중 차분된 코드( $\psi$ )와 반송파 위상( $\phi$ ) 측정치를 이용한 정밀위치 결정 기법을 고려하였으며, 사용되는 선형화 기준점에서 선형화한 이중 차분된 코드( $\rho$ )와 반송파 위상( $l$ ) 측정식은 식 (1)과 같다[6].

$$\begin{aligned} \rho &= \Psi - r_0 = Hb + v \\ l &= \Phi - r_0 = Hb + \lambda a + w \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $r_0$ 는 위성과 선형화 기준점 사이의 계산된 이중 차분된 거리,  $\mu$ 는 선형화 기준점에서 위성으로의 시선벡터의 단일 차분된 행렬,  $b$ 는 기준국에서 사용자 사이의 기저선 벡터,  $a$ 는 이중 차분된 미지정수,  $\lambda$ 는 파장을 나타낸다.  $v$ 는 이중 차분된 코드 측정 오차를 나타내며 평균은 0, 분산은  $\sigma_v^2 I$ 인 AWGN,  $w$ 는 이중 차분된 반송파 위상 측정오차를 나타내며 평균은 0, 분산은  $\sigma_w^2 I$ 인 AWGN,  $\sigma_v$ 과  $\sigma_w$ 은 각각 코드와 반송파 위상 측정오차의 표준편차를 나타낸다. 본 논문에서는 항법 사용자를 고려하여 매 epoch 측정치로 해를 구하는 epoch-by-epoch 기법을 고려하며, 처리과정은 그림 1과 같다.

실수해 단계는 이중차분된 코드와 반송파 위상 측정치를 이용하여 실수해의 기저선 벡터( $\hat{b}$ )와 실수 미지정수( $\hat{a}$ )를 계산한다. 미지정수 검색 단계는 실수 미지정수와 실수 미지정수의 공분산( $Q_a$ )을 이용하여 미지정수( $\hat{a}$ )를 검색하고 결정한다. 본 논문에서는 가장 대표적인 LAMBDA 기법을 고려하였다. 마지막 정수해 단계는 결정된 미지정수를 이용하여 최종 기저선 벡터( $\hat{b}$ )를 계산한다.

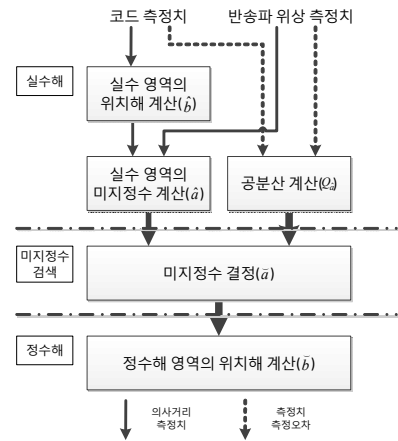


그림 1 반송파를 이용한 정밀 위치 결정 기법

Fig. 1 The CDGPS using the carrier phase measurements

식 (1)을 식 (2)로 나타낼 수 있으며, LAMBDA 기법에서의 실수해는 식 (2)를 간단히 나타낸 식 (3)에 가장 최소자승법을 적용하여 식 (4)의 기대값과 식 (5)의 공분산을 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \rho \\ l \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} H \\ H \end{bmatrix} b + \begin{bmatrix} 0 \\ \lambda I \end{bmatrix} a + \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix} \sim N\left(0, \begin{bmatrix} \sigma_v^2 Q & 0 \\ 0 & \sigma_w^2 Q \end{bmatrix}\right) \quad (2)$$

$$y = Bb + Aa + e = \begin{bmatrix} B & A \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b \\ a \end{bmatrix} + e \sim N(0, Q_y) \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{a} \end{bmatrix} = \left[ \begin{bmatrix} B & A \end{bmatrix}^T Q_y^{-1} \begin{bmatrix} B & A \end{bmatrix} \right]^{-1} \begin{bmatrix} B & A \end{bmatrix}^T Q_y^{-1} y \quad (4)$$

$$COV \begin{bmatrix} \hat{b} \\ \hat{a} \end{bmatrix} = \left[ \begin{bmatrix} B & A \end{bmatrix}^T Q_y^{-1} \begin{bmatrix} B & A \end{bmatrix} \right]^{-1} \quad (5)$$

식(4)에서 보는 바와 같이 측정치에 바이어스가 포함된 경우, 구해진 실수해도 바이어스가 포함되며 이로 인하여 미지정수 결정 성공률의 감소 원인으로 알려져 있다[10]. 이온층 지연, 대류권 지연 등 공간적으로 공통인 오차는 이중차분에 의하여 쉽게 제거되지만 다중경로는 공통 오차가 아니며 AWGN과 다른 형태의 오차이므로 바이어스의 원인으로 작용하게 된다. 특히 epoch-by-epoch 기법으로 처리하는 경우의 위치해는 코드 측정치만으로 구하고, 구해진 위치해를 반송파 위상 측정치에 대입하여 실수 영역의 미지정수를 구하는 것과 동일한 것으로 알려져 있다[6]. 따라서 이 경우 코드 측정치의 바이어스가 실수 위치해와 미지정수 결정에 모두 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 기존 연구에서는 가장 최소자승법 대신 칼만필터를 이용하여 다중경로 등의 영향을 줄여 성능을 향상시킬 수 있음을 보였다[9].

실수해를 구하기 위한 칼만필터의 측정 방정식은 식 (3)을 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $k$ 는 시각을,  $x(k)$ 는 상태 벡터를 나타낸다.

$$y(k) = C(k)x(k) + e(k) \quad (6)$$

칼만 필터의 상태 방정식은 식(7)과 같다.

$$x(k) = A_{k/k-1}x(k-1) + \eta(k-1) \quad (7)$$

여기서  $A_{k/k-1}$ 는 시스템의 상태 천이 행렬,  $\eta(k)$ 는 시스템의 모델 오차를 나타낸다. 미지정수는 상수이고 사용자가 위치 오차를 등속모델로 가정하면, 시스템의 상태 천이 행렬은 식(8)과 같다.

$$A_{k/k-1} = \begin{bmatrix} I_3 & 0 \\ 0 & I_m \end{bmatrix} \quad (8)$$

$I_m$ 는  $m$ 차원의 단위행렬이다. 상태변수 모델 오차의 공분산 행렬은 식(9)와 같다.

$$\eta(k) \sim N(0, Q_x) = N\left(0, \begin{bmatrix} q_p \times I_3 & 0 \\ 0 & q_n \times I_m \end{bmatrix}\right) \quad (9)$$

여기서,  $q_p$ ,  $q_n$ 는 각각 위치와 미지정수 오차의 공분산 크기이다. 식(6)의 측정 방정식과 식(7)의 상태 방정식을 이용하면 칼만 필터로부터 상태 변수인 실수해와 실수 미지정수를 구할 수 있다.

### 3. CDGPS에서 다중경로 오차의 영향 및 형상필터 설계

앞 절의 칼만 필터는 시스템의 모델 오차와 측정 잡음이 AWGN을 가정하고 상태 변수를 추정한다. 그러나 다중경로 등의 영향과 사용자와 기준국간의 거리가 멀어질수록 위성 신호는 전송 경로 상에 포함된 공간적 오차가 상이하여 이중차분 기법으로도 비공통 오차를 완전히 제거하지 못하므로 AWGN의 가정이 성립하지 않는다. 이와 같은 비공통 오차 증가는 칼만 필터에서 가정된 측정치 잡음 특성과 상이하여 성능을 저해하는 요인이 된다.

이중차분 측정치 잡음 특성 분석을 위한 데이터 수집은 그림 2에서와 같이 충남대학교 공과대학 2호관 옥상의 2개의 측지점을 이용하여 수집하였다. 2개의 측지점은 기준국과 사용자로 구성되어있으며, 기준국과 사용자간의 단기저선 거리는 36m이다.

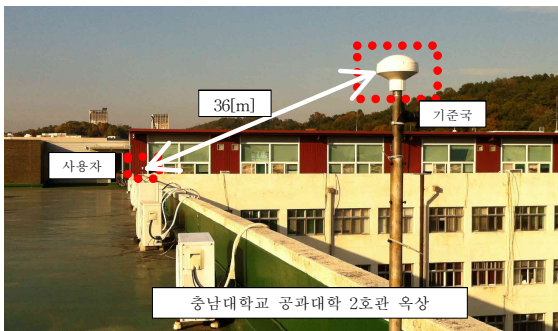


그림 2 실험 환경  
Fig. 2 Test environment

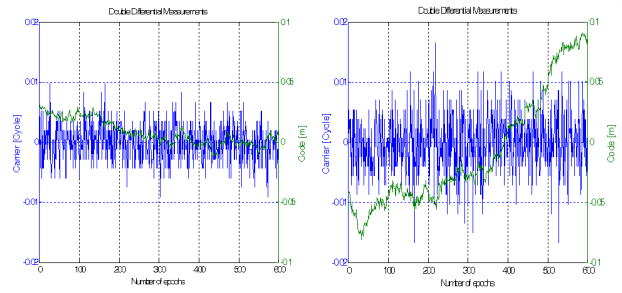


그림 3 이중차분 측정치 (왼쪽 : 영기저선, 오른쪽 : 단기저선[36m])  
Fig. 3 Double difference measurements (Left : zero baseline, Right : short baseline[36m])

측정치 잡음의 특성을 분석하기 위하여 본 논문에서는 기준국에서 하나의 안테나로 기준국과 사용자가 수집한 영기저선 측정치와 기준국과 사용자가 다른 안테나를 이용하여 수집한 단기저선 측정치를 이용하였다. 그림 3에서와 같이 영기저선의 이중차분된 측정치는 공간상 오차 성분뿐만 아니라 다중경로 등 수집환경이 동일하므로 이중차분된 코드와 반송파 위상 측정치 잡음 특성이 AWGN으로 나타남을 확인할 수 있다. 반면 기저선이 길이를 가지는 경우는 다중경로 등 비공통 오차로 인하여 이중 차분된 코드 측정치가 AWGN 특성을 가지지 않음을 볼 수 있다. 특히 반송파 위상 측정치에는 영향이 크게 나타나지 않지만 코드 측정치에는 큰 영향을 미치는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서는 코드 측정치의 잡음 특성이 미지정수 결정 성공률 저하의 원인으로 판단하고, 이를 제거하기 위하여 측정 잡음의 오차를 그림 4와 같은 2차 Gauss-Markov 프로세서로 모델링하였다. 여기서  $\beta$ 는 다중경로의 변화율이 미치는 정도를 나타내는 변수로 수집 환경에 따라 변경되어야 한다. 다중경로 신호는 환경에 따라 모델링 하는 것이 어려워 본 논문에서는 여러 후보의  $\beta$  값에 따른 참 미지정수 결정 성공률을 바탕으로 가장 우수한 성능을 보이는  $\beta$ 를 선택하였다.

그림 3의 Gauss-Markov 프로세서는 식(10)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} M(k) \\ \square \\ M(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \beta\Delta t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} M(k-1) \\ \square \\ M(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \square \\ \epsilon_1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서  $\Delta t$ 는 샘플링 시간을,  $q_m = \text{cov}[\epsilon_1]$ 을 나타내며,  $\text{cov} \begin{bmatrix} M(k) \\ \square \\ M(k) \end{bmatrix} = q_m \begin{bmatrix} (\beta\Delta t)^2 & \beta\Delta t \\ \beta\Delta t & 1 \end{bmatrix}$ 로 정의한다.

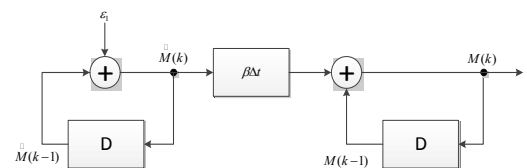


그림 4 2차 Gauss-Markov 프로세서 블록도  
Fig. 4 Block diagram of second-order Gauss-Markov processor

식 (10)은 두 개의 위성과 두 개의 수신기에서 구한 이중 차분된 코드 측정치에 대한 오차 모델을 나타내며,  $i$ 번째와  $j$ 번째 위성에 대하여 식 (10)을 식 (11)과 같이 간단히 나타낼 수 있다. 여기서  $Q_m^i = \text{cov} \begin{bmatrix} M^i(k) \\ M^j(k) \end{bmatrix}$ 를 나타낸다.

$$x_s^{ij}(k) = A_s^{ij} x_s^{ij}(k-1) + \eta_s^{ij}(k-1) \sim N(0, Q_m^i) \quad (11)$$

$m$ 개의 위성에 대해서 식(11)은 다음과 같이 확장된다.

$$\begin{bmatrix} x_s^{12}(k) \\ x_s^{23}(k) \\ \vdots \\ x_s^{(m-1)m}(k) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_s^{12} & 0 & 0 \\ 0 & A_s^{23} & 0 \\ & & \ddots \\ 0 & 0 & A_s^{(m-1)m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_s^{12}(k-1) \\ x_s^{23}(k-1) \\ \vdots \\ x_s^{(m-1)m}(k-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \eta_s^{12}(k-1) \\ \eta_s^{23}(k-1) \\ \vdots \\ \eta_s^{(m-1)m}(k-1) \end{bmatrix} \quad (12)$$

식 (12)는 식 (13)의 간단한 형태로 나타내고 사용한다.

$$x_s(k) = A_s x_s(k-1) + \eta_s(k-1) \quad (13)$$

여기서  $A_s^{12} = A_s^{23} = \dots = A^{(m-1)m}$ ,  $Q_m^i = Q_m^{23} = \dots = Q_m^{(m-1)m}$ ,  $\eta_s(k) \sim N(0, \begin{bmatrix} Q_m^2 & 0 \\ 0 & Q_m^2 \end{bmatrix}) = N(0, Q_s)$

이며 대각행렬로 나타나는 이유는 원시 측정치가 아닌 이중 차분된 측정치에 대한 오차모델을 고려하므로 각각의 측정치를 서로 독립으로 처리할 수 있기 때문이다. 앞 절의 칼만 필터에 식(11)의 형상 필터를 추가한 확장된 칼만 필터는 다음과 같이 설계한다. 측정 오차의 형상 필터가 추가된 시스템의 상태변수를 식(14)로 정의한다.

$$x_a(k) = \begin{bmatrix} x(k) \\ x_s(k) \end{bmatrix} \quad (14)$$

확장된 상태변수에 대하여 상태방정식은 다음과 같다. 여기서  $\eta_s(k-1) = \begin{bmatrix} \eta_s^{(k-1)} \\ \eta_s^{(k-1)} \end{bmatrix} \sim N(0, \begin{bmatrix} Q_s & 0 \\ 0 & Q_s \end{bmatrix}) = N(0, Q_a)$  이다.

$$x_a(k) = \begin{bmatrix} A_{k|k-1} & 0 \\ 0 & A_s \end{bmatrix} x_a(k-1) + \eta_a(k-1) \quad (15)$$

본 논문에서는 식(6)의 칼만 필터의 측정 방정식에서 코드 측정치의 잡음  $v$ 가 AWGN이 아닌 식 (13)의 동특성을 갖는 프로세서로 가정하고 구한 형상 필터를 추가하므로 확장된 칼만 필터의 측정 방정식은 다음과 같이 변경된다.

$$\begin{aligned} y_a(k) &= C(k)x(k) + e(k) = C(k)x(k) + D(k)x_s(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ w(k) \end{bmatrix} \\ &= [C(k) \quad D(k)]x_a(k) + e_a(k) = C_a(k)x_a(k) + e_a(k) \end{aligned} \quad (16)$$

여기서  $w(k) \sim N(0, \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & \sigma^2 Q \end{bmatrix}) = N(0, Q_w)$  이고  $D(k)$ 는 식(10)과 (12)로부터 다음과 같다.

$$D(k) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ & & & & \ddots & \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (17)$$

식(15)의 상태 방정식과 식(16)의 측정 방정식을 이용하면 형상필터가 추가된 확장된 칼만 필터로 상태 변수인 실수해를 구할 수 있다.

### 4. 실험 및 분석

#### 4.1 실험 환경

제안한 기법은 MATLAB을 이용하여 구현하였으며, NovAtel Propak-V3[16]을 이용하여 충남대학교 공과대학 2호관 옥상에서 수집한 측정치를 이용하여 성능을 검증하였다. 1Hz 주기로 총 300개의 측정치를 이용하였다. 실수해는 일반적으로 사용하는 가중 최소자승법, 칼만필터와 본 논문에서 제안한 형상필터가 추가된 칼만필터에 대해서 epoch-by-epoch 후처리를 통하여 성능을 비교하였다. 측정치는 기저선 길이가 36m인 정적인 상황에서 수집하였으며, 수집된 시간동안 위성의 배치는 그림 5와 같다. 실험 기간 동안 8개의 위성이 관측되었으며 PDOP(Positional Dilution of Precision)은 2.496 이었다. 그림 6에서는 -10에서 0 범위로 1 간격으로  $\beta$  값에 따른 참 미지정수 결정 성공률을 확인하였다. 본 논문에서의  $\beta$  값은 -6에서 -4 사이의 값인 -5로 결정하였다.

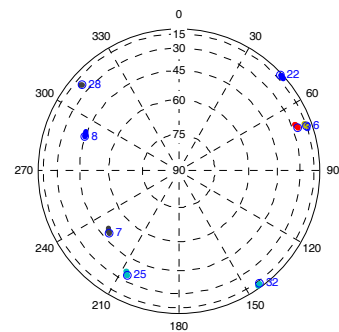


그림 5 실험 기간 동안의 위성 배치  
Fig. 5 Satellite constellation

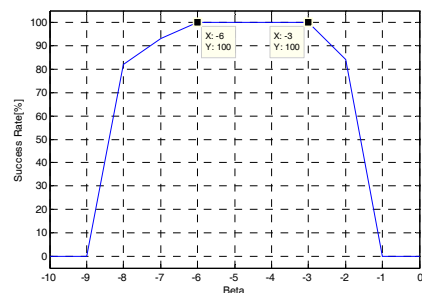


그림 6  $\beta$ 에 따른 미지정수 결정 성공률  
Fig. 6 Ambiguity resolution success rate as  $\beta$

### 4.2 실험 결과

본 논문에서 제안한 구조의 성능분석을 위해 실수 영역에서의 위치해와 미지정수 결정에 따른 정수 영역에서의 위치해를 확인하였다. 실수 영역에서의 위치해는 가중 최소자승법, 칼만필터와 형상필터가 추가된 칼만필터에 대하여 위치해를 계산하여 수평 오차 값(2DRMS)으로 확인하였으며, 결과는 다음 표 1과 같다.

표 1 실수해의 수평 항법 오차(2DRMS)

Table 1 Horizontal position error of float solution(2DRMS)

기법	가중 최소자승법	칼만 필터	형상필터가 추가된 칼만필터
실수 영역에서의 위치해	1.978[m]	1.200[m]	1.166[m]

세 기법 중 형상필터가 추가된 칼만필터의 실수 영역에서의 위치해 성능이 가장 우수하며, 실수 영역에서의 위치해가

실수영역에서의 미지정수에 영향을 미치는 것을 확인하기 위하여 그림 7과 같이 실수 미지정수 오차와 참 미지정수 결정 성공률과의 관계를 확인하였다. 그림 7에서의 이중 차분된 위성 신호에 대한 실수 미지정수 오차는 미지정수 검색을 위한 바이어스 오차 성분으로 0을 기준으로 한다. 실수 미지정수 오차가 클 경우 참 미지정수 결정에 실패할 확률이 크며, 참 미지정수 결정 성공 여부는 미지정수가 참 미지정수와 동일한 경우 10으로 동일하지 않은 경우 -10으로 구분하여 실수 미지정수 오차 결과에 점으로 표기 하였다. 그림 8에서의 실수 미지정수의 공분산은 검색 범위를 나타낸다. 검색 범위에 따른 참 미지정수 결정 성공 여부는 미지정수가 참 미지정수와 동일한 경우 60으로 동일하지 않은 경우 -5로 구분하여 실수 미지정수의 공분산 결과에 점으로 표기 하였다.

그림 7, 8에서와 같이 가중 최소자승법과 칼만필터의 경우 실수 미지정수와 공분산으로 결정된 검색범위에 참 미지정수가 존재하지 않아 미지정수 결정에 실패하는 확률이 높은 것을 확인할 수 있다. 가중 최소자승법을 사용하는 경우 300번의 미지정수 결정에 대하여 17번만 참 미지정수를 결

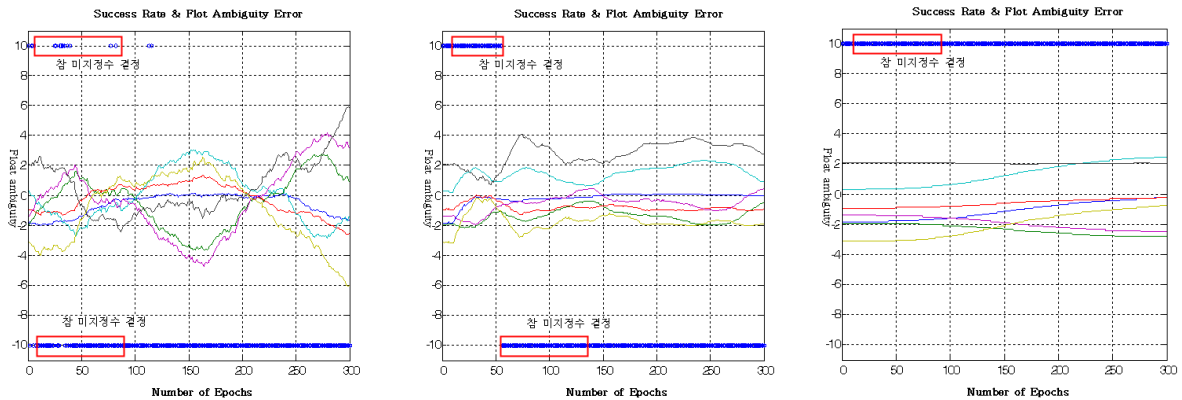


그림 7 실수 미지정수 오차와 참 미지정수 결정 성공률 (왼쪽 : 가중 최소자승법, 중앙 : 칼만필터, 오른쪽 : 형상필터가 추가된 칼만필터)

Fig. 7 Float integer ambiguity error and true ambiguity resolution success rate (WLSQ, Kalman filter, Shaping Kalman filter)

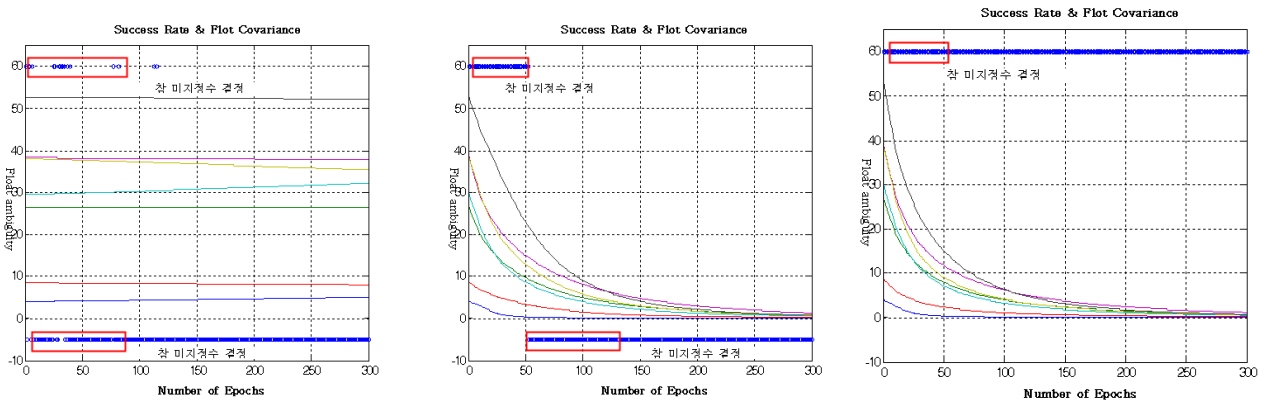


그림 8 실수 미지정수의 공분산과 참 미지정수 결정 성공률 (왼쪽 : 가중 최소자승법, 중앙 : 칼만필터, 오른쪽 : 형상필터가 추가된 칼만필터)

Fig. 8 Covariance of float integer ambiguity and true ambiguity resolution success rate(WLSQ, Kalman filter, Shaping Kalman filter)

정하였으며, 칼만필터를 사용하는 경우 55번 참 미지정수를 결정함을 볼 수 있다. 그러나 형상필터가 추가된 칼만필터는 다른 두 기법에 비하여 실수 미지정수의 바이어스 성분이 작은 값을 가지며, 공분산으로 결정된 범위 내에 참 미지정수가 존재하여 300번 미지정수 결정에 대하여 모두 참 미지정수를 결정할 수 있었다. 그림에서 미지정수 결정 성공률은 추정된 실수미지정수의 공분산보다 바이어스에 더 많은 영향을 받음을 확인할 수 있다. 따라서 논문에서 제안한 형상필터가 추가된 칼만필터가 가장 높은 참 미지정수 결정 성공률을 가지며 표 2에 그 결과를 정리하였다.

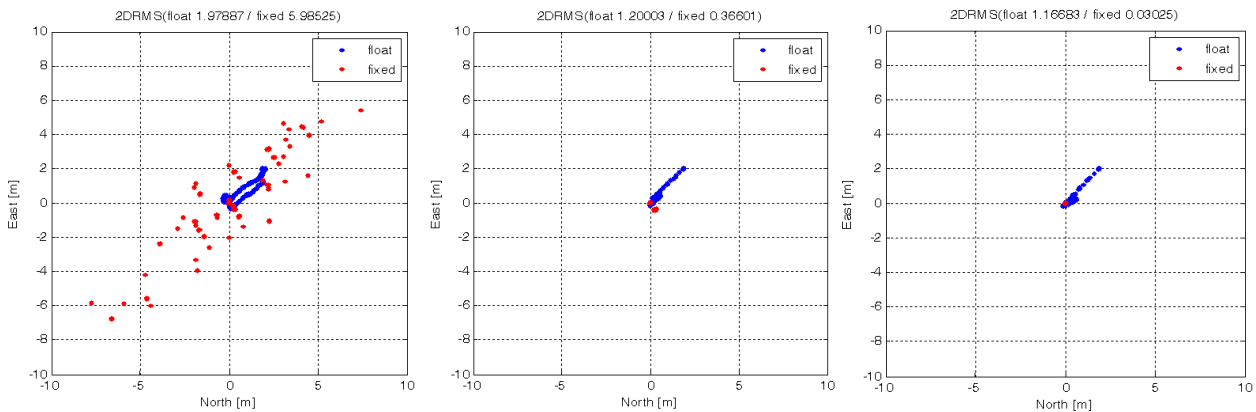
**표 2** 실수해와 참 미지정수 결정 성공률  
**Table 2** Float solution and true ambiguity resolution success rate

기법	참 미지정수 결정 성공률[%]
가중 최소자승법	5% ( 17 / 300 )
칼만필터	18% ( 55 / 300 )
형상필터가 추가된 칼만필터	100% ( 300 / 300 )

실수 영역에서의 미지정수를 이용하여 구한 위치 오차와 결정된 정수 영역에서의 미지정수를 이용하여 구한 최종 위치 오차는 그림 8과 같다. 그림에서 실수 위치해는 세 가지 방법의 결과가 비슷한 범위에 분포하지만 가중 최소자승법과 칼만필터로 구한 정수 위치해는 잘못 결정된 미지정수의 영향으로 여러 곳에 흩어진 결과를 나타내는 반면 형상필터가 추가된 칼만필터를 이용하여 구한 정수 위치해는 3cm[2DRMS] 이내에 몰려서 나타남을 볼 수 있다. 표 3에 수평면에서의 항법오차를 정리하였다.

**표 3** 정수해의 수평 항법 오차(2DRMS)  
**Table 3** Horizontal position error of fixed solution(2DRMS)

기법	가중 최소자승법	칼만필터	형상필터가 추가된 칼만필터
정수 영역에서의 위치해	98.65[m]	6.88[m]	100[m]



**그림 8** 수평 항법 오차(2DRMS) (왼쪽 : 가중 최소자승법, 중앙 : 칼만필터, 오른쪽 : 형상필터가 추가된 칼만필터)

**Fig. 8** Horizontal position error(2DRMS) (WLSQ, Kalman filter, Shaping Kalman filter)

## 5. 결 론

본 논문에서는 이중차분 측정치의 측정 잡음 특성이 AWGN이 아닌 경우 미지정수 결정 성능의 저해 요인으로 판단하고 실측치를 이용하여 측정 잡음 특성을 분석하였다. 그 결과 반송파 위상 측정치에서 다중경로 오차의 크기는 무시할 정도로 작아 AWGN 특성을 가진다고 가정할 수 있지만, 코드측정치에서는 AWGN 특성을 가진다고 가정할 수 없음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 성능 향상을 위한 코드 측정치의 측정 잡음을 2차 Gauss-Markov 프로세서로 모델링하고, 이를 기존의 칼만필터에 형상필터를 추가한 확장된 칼만필터로 구성하였다. 제안한 형상필터가 추가된 칼만필터는 실측치를 이용하여 기존의 가중 최소자승법이나 칼만필터보다 실수해의 항법 성능과 공분산 성능이 우수한 것을 확인하였다. 특히, 참 미지정수 결정률은 기존의 칼만 필터의 경우 18%에 불과하지만 제안한 형상필터가 추가된 칼만필터의 경우 100%로 향상되고, 이에 따라 항법 오차가 3cm로 감소된 것을 확인하였다. 제안한 방법은 하드웨어의 추가 없이 소프트웨어의 변경만으로 저가의 수신기를 이용한 정밀측위 혹은 정밀 자세 시스템의 성능향상에 사용될 수 있다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부 위성항법기반 교통인프라 기술개발의 연구비지원(06교통핵심A03)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

- [1] Pratap Misra, Per Enge, Global Positioning system : Signals, Measurements, and Performance, 2nd Ed., Ganga-Jamuna Press, 2006.
- [2] Feng Y, Rizos C, Higgins M, "Multiple carrier ambiguity resolution and performance benefits for RTK and PPP positioning services in regional

areas”, In: Proceedings of ION GNSS 20th international technical meeting of the satellite division, pp 668 - 678, 25 - 28 September 2007, Fort Worth, TX, USA,

[3] Jaewoo Jung, Per Enge, “Optimization of Cascade Integer Resolution with Three Civil GPS Frequencies”, ION GPS’2000, Salt Lake City, September 2000.

[4] Chansik Park, “Efficient Ambiguity Resolution using Constraint Equation”, Proceedings of the 1996 IEEE Position Location and Navigation Symposium, p 277-284, PLANS, Atlanta, GA, USA.

[5] Teunissen PJG, “Success probability of integer GPS ambiguity rounding and bootstrapping”, J Geod 72: 606-6121, 998

[6] 한덕희, 박찬식, 황동환, 이상정, “Epoch-by-epoch GNSS 정밀 측위에서 실수해의 특성” 제어·로봇·시스템학회 논문지, 제15권 제12호, pp. 1254-1257, 2009.

[7] Fenton, P. C., & Jones, J. (2000), “The theory and performance of Novatel inc.’s Vision Correlator”, Proceedings of the International Technical Meeting of the Institute of Navigation, ION-GNSS, pp. 13-16, Long Beach, California, September 2005.

[8] Chiou, T-Y, “GPS Receiver Performance Using Inertial-Aided Carrier Tracking Loop”, in Proceedings of ION GNSS, 13-16 September, Long Beach CA, U.S. Institute of Navigation, Fairfax VA, USA, pp. 2895-2910, 2005. 9

[9] 최병규, “중거리 기선 측지 성능 개선을 위한 지역 전리층 모델 개발”, 충남대학교대학원, 제어전공, 박사학위 논문, 2009.

[10] Teunissen PJG, “Integer estimation in the presence of biases”, J. Geod., vol. 75, pp.399-408, 2001

[11] P. Joosten and M. Irsigler, “GNSS ambiguity resolution in the presence of multipath”, Technical report, Mathematical Geodesy and Positioning, Delft University of Technology, The Netherlands.

[12] Danskin, S., P. Bettinger, and T. Jordan., “Multipath mitigation under forest canopies : A choke ring antenna solution“, Forest Science vol. 55(2), pp. 109-116, 2009.

[13] Townsend, B. and P. Fenton, “A Practical Approach to the Reduction of Pseudorange Multipath Errors in a L1 GPS Receiver”, Proceedings of ION GPS-94, Salt Lake City, September 20-23, pp. 143-148, 1994.

[14] R. Van Nee, J. Sierveld, P. Fention, and B. Townsend, “The multipath estimating delay lock loop: Approaching theoretical accuracy limits”, in Proc. IEEE Position, Location, and Navigation Symp., pp. 246-251, 1994.

[15] Ray, J., “Mitigation of GPS Code and Carrier Phase Multipath Effects Using a Multi-Antenna System”, PhD Thesis, Department of Geomatics Engineering,

University of Calgary, Alberta, Canada, UCGE Reports Number 20136, 2000  
 [16] <http://www.novatel.com>

## 저 자 소 개



### 조 성 룡 (曹成龍)

1983년 9월 5일생. 2007년 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업. 2010년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2010년-현재 동 대학원 전자전파정보통신공학과 박사과정.

Tel : 042-825-3991

E-mail : jackycho@cnu.ac.kr



### 한 영 훈 (韓永勳)

1985년 7월 18일생. 2010년 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업. 2010년-현재 동 대학원 전자전파정보통신공학과 석사과정.

Tel : 042-825-3991

E-mail : noranna@cnu.ac.kr



### 최 헌 호 (崔憲好)

1981년 6월 20일생. 2008년 충남대학교 전기정보통신공학부 졸업. 2010년 충남대학교 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2010년-현재 동 대학원 전자전파정보통신공학과 박사과정.

Tel : 042-825-3991

E-mail : heonho@cnu.ac.kr

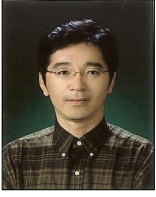


### 허 문 범 (許文範)

1992년 경희대학교 기계공학과(공학사). 1997년 Illinois Institute of Technology 항공기계(공학석사). 2004년 동 대학원(공학박사). 2005년~현재 한국항공우주연구원 위성항행항법 팀장. 관심분야는 무결성 감시 기법, 위치 추적 기술, 교통인프라 기술.

Tel : 042-860-2266

E-mail : heomb@kari.re.kr



**박 찬 식 (朴 贊 植)**

1961년 10월 1일생. 1984년 서울대학교 제어계측공학과 졸업. 1986년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1984년-1997년 삼성전자 연구원. 1997년 서울대학교 제어계측공학과 졸업(박사). 1997년-현재 충북대학교 교수.

Tel : 043-261-3259

E-mail : chansp@cbnu.ac.kr



**이 상 정 (李 相 禎)**

1957년 8월 15일생. 1979년 서울대학교 전자공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사) 1987년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사) 1987년-현재 충남대학교 교수.

Tel : 042-821-6582

E-mail : eesjl@cnu.ac.kr