Journal of the KIMST, Vol. 20, No. 2, pp. 272-278, 2017
ISSN 1598-9127
DOI http://dx.doi.org/10.9766/KIMST.2017.20.2.272

Research Paper 정보 · 통신 부문

다변수 모노펄스 추적 시스템에서 유전 알고리즘 기반 선형구간 확장

정진우*,1) · 김재신1) · 류영재1)

1) 국방과학연구소 제2기술연구본부

Genetic Algorithm Based Linear Region Extension for Multivariable Monopulse Tracking Systems

Jinwoo Jung*,1) · Jaesin Kim1) · Young-Jae Ryu1)

1) *The 2nd Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea*

(Received 25 July 2016 / Revised 14 November 2016 / Accepted 10 February 2017)

ABSTRACT

In this paper, we consider a single-channel amplitude comparison monopulse system(SCACMS). The monopulse ratio curve(MR-C) of the SCACMS can be controlled by an amplitude difference between sum and different signal, a phase difference and the coefficient of the signal processor. We first propose the SCACMS with multiple variables, and then apply a genetic algorithm to optimize the multiple variables in terms of minimizing a root mean square error. The simulation results show that when three variables of the SCACMS are jointly optimized, the linear region of the MR-C can be extended approximately 187 % compared to that of two variables.

Key Words : Monopulse Tracking(모노펄스 추적), Monopulse Ratio Curve(모노펄스 기울기 곡선), Linear Region(선형구간), Genetic Algorithm(유전 알고리즘)

1. 서 론

모노펄스 추적 시스템은 상대국의 전파 전파 신호를 기반으로 상대국을 지속적으로 추적하는 시스템 중 하나로, 다중 급전 안테나를 이용해 동시에 서로 다른 신호를 수신하고, 이를 비교하여 추정각을 산출하기 때문에, 추적을 위한 추정각 산출 속도가 빠르고 높은 추정 정확도를 유지할 수 있는 장점이 있다[1,2]. 따라서 위성의 지상국이나 유·무인기 광대역 통신신호 송수신을 위한 지상추적시스템에 적용이 용이하다.

모노펄스 시스템 중, 단일채널 진폭비교 방식은 추적을 위한 좌/우(혹은 상/하) 구분을 위한 합신호와 차신호의 위상 비교가 필요 없을 뿐만 아니라, 서로 다른 중간주파수 채널 경로에 따른 오차가 발생하지 않고[3], 합신호와 차신호의 이득 차이 및 신호 처리부의 계수값 조절을 통해 전통적인 3채널 모노펄스 시스템의 기울기를 유도할 수 있는 장점이 있다[4].

* Corresponding author, E-mail: crazytis@hanmail.net
Copyright ⓒ The Korea Institute of Military Science and Technology

모노펄스 기울기 곡선(Monopulse Ratio Curve, MR-C)은 설계된 모노펄스 시스템에 의해 산출되는 추정각을 나타내는 지표로서 안테나 구동 제어를 위한 제어값이 된다. 따라서 MR-C의 선형 구간이 확장될수록 넓은 구간에서 정확한 안테나 구동제어가 되고, 이에 따라 추적 정확도가 높아지게 된다.

일반적인 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 MR-C는 tangent 함(혹은 3차 방정식 함수)와 유사한 형태이기 때문에 최적화를 수행하여도, 안테나 중심축 인근 영역에서만 선형 특성을 갖게 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 MR-C 제어에 있어, 합·차신호의 이득 차이 및 신호 처리부의 계수값 조절을 exhaustive 알고리즘을 이용한 기존 연구 결과[4]를 발전시켜 변수가 증가하여도 낮은 복잡도를 가지는 유전 알고리즘(Genetic Algorithm, GA)을 본 시스템에 적용할 수 있음을 보인다. 또한 두 가지 변수 이외에 추가로 합·차신호 경로의 위상 차이를 변수로 두어 GA 최적화 과정을 통해 MR-C의 선형구간이 보다 더 확장 가능함을 확인하였다. 단일채널 진폭비교 다변수 모노펄스 시스템의 구성 및 MR-C에 관한 내용은 다음 절에 상세하게 기술하였다.

2. 단일채널 진폭비교 다변수 모노펄스 시스템

본 절에서는 다변수를 가진 모노펄스 시스템 모델을 기술하고, 변수 변화에 의해 MR-C의 제어 모습을 보여준다. Fig. 1은 본 논문에서 고려하고 있는 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 간소화된 구성도이다. 구성도에 따른 추정각 산출 절차는 다음과 같다.

1) 다중 급전 안테나에 의해 안테나 중심축을 기준으로 서로 다른 신호 수신(A, B, C 그리고 D).
2) 모노펄스 비교기에 의해 합(S), 방위각 차(D_{AZ}) 그리고 앙각 차(D_{EL}) 신호로 변환.
3) 스위치(S/W)에 의해 방위각 차 혹은 앙각 차 신호 선택.
4) 180도 위상 변환기(Bi-P/M)에 의해 차신호의 위상을 합신호 기준 동위상 및 역위상으로 변환.
5) 신호 결합기(Combiner)에 의해 (합+차)와 (합−차) 신호생성.
6) 검출기(Log Detector)에 의해 (합+차)와 (합−차) 신호 검출.

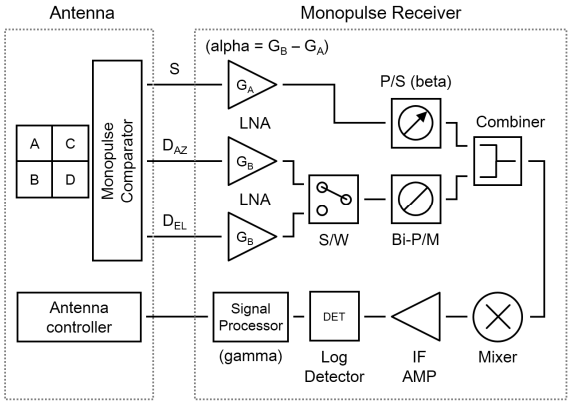

Fig. 1. Simplified block diagram of a single channel amplitude comparison multivariable monopulse system

7) 신호 처리부(Signal Processor)에 의해 (합+차)와 (합−차) 값의 '−' 연산을 통한 추정각 산출.

Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 본 논문에서는 전통적인 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템에서 합 및 차신호 경로의 이득 차이(α), 합신호 경로의 위상 변화(β) 및 신호 처리부의 계수값(γ)을 조절 가능한 변수로 두었다. 전통적인 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템은 합 및 차신호 경로의 이득 차이(α)가 없고, 신호 처리부의 계수값(γ)이 '1'이며, 합신호 경로의 위상 변화(β)가 없어 합 및 차 신호가 동위상일 경우이다.

상기 절차 및 조건에 따른 전통적인 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 이격 각도(θ)에 따른 MR-C의 산출값(U)은 다음과 같다.(여기서, IF AMP와 Log Detector에 의한 산출값은 '1'로 가정하였다.)

$$U = 20\log_{10}\left|\frac{1+X(\theta)}{1-X(\theta)}\right| \tag{1}$$

여기서 $X(\theta)$는 다중 급전 안테나와 모노펄스 비교기에 의해 산출되는 합신호와 차신호의 비로, $D/S(\theta)$이다.

Fig. 1의 안테나부에서 4개의 급전 안테나와 모노펄스 비교기에 의한 합신호(S), 방위각 차신호(D_{AZ}) 그리고 앙각 차신호(D_{EL})는 다음과 같다.

$$S = A_A(\theta) + A_B(\theta) + A_C(\theta) + A_D(\theta) \tag{2}$$

$$D_{AZ} = A_{AB}(\theta) - A_{CD}(\theta) \tag{3}$$

$$D_{EL} = A_{AC}(\theta) - A_{BD}(\theta) \tag{4}$$

방위각 및 앙각 추정각 산출은 상기 절차 3)에 의해 선택된 차신호에 의해 결정된다. 방위각 및 앙각 차신호 선택 이후의 추정각 산출 절차는 동일하므로, 이하 방위각 차신호 선택을 기준으로 기술한다.

기존 연구[4]에서는 수식 (1)의 산출값에 합신호와 차신호의 이득 차이(α)와 신호처리부의 계수(γ)을 추가하여 모노펄스 기울기를 변화 시킬 수 있음을 확인하였다. 상기 변수 값을 추가한 MR-C의 산출값($U_{\alpha,\gamma}$)은 다음과 같이 정리 된다.

$$U_{\alpha,\gamma} = \gamma\, 20\log_{10}\left|\frac{1+X_{AZ}(\theta)10^{\alpha/20}}{1-X_{AZ}(\theta)10^{\alpha/20}}\right| \tag{5}$$

수식 (5)에서 알 수 있듯이, 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 모노펄스 기울기는 합신호와 차신호의 비에 관한 함수이기 때문에 합 및 차 신호의 크기(이득)차이에 의해 변화된다.

상기 원리를 이용하여 본 논문에서는 합신호와 차신호의 비를 추가 변형할 수 있는 합신호와 차신호의 위상차이(β)를 변수로 추가하였다. 이에 따른 MR-C의 산출값($U_{\alpha,\beta,\gamma}$)은 다음과 같이 정리된다.

$$U_{\alpha,\beta,\gamma} = \gamma\, 20\log_{10}\left|\frac{1+X_{AZ}(\theta)10^{\alpha/20}e^{-j\beta}}{1-X_{AZ}(\theta)10^{\alpha/20}e^{-j\beta}}\right| \tag{6}$$

수식 (1), (5) 그리고 (6)에 따른 MR-C를 분석하기 위해서는 안테나에 의해 산출되는 $X_{AZ}(\theta)$정보가 제공되어야 한다. 본 논문에서는 주 반사경의 직경이 60λ인 ADE(Axially Displaced Ellipse) 이중 반사경에 다중급전 안테나에 의해 산출된 합 및 차 신호를 사용하였다. Fig. 2는 상기 조건에 따른 A_{AB}, A_{CD}, S, D_{AZ}의 신호 및 방사 패턴을 보여준다. 합신호를 기준으로 정규화 되어 있다.

Fig. 3은 Fig. 2의 신호 정보와 다양한 'α', 'β' 그리고 'γ'에 따른 모노펄스 시스템의 산출값인 수식 (6)의 결과를 보여준다. 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 MR-C는 합 및 차채널의 이득 차이(α)와 신호처리부의 계수값(γ) 뿐만 아니라 합 및 차 신호 경로의 위상차이(β)에 의해서도 변화됨을 알 수 있다.

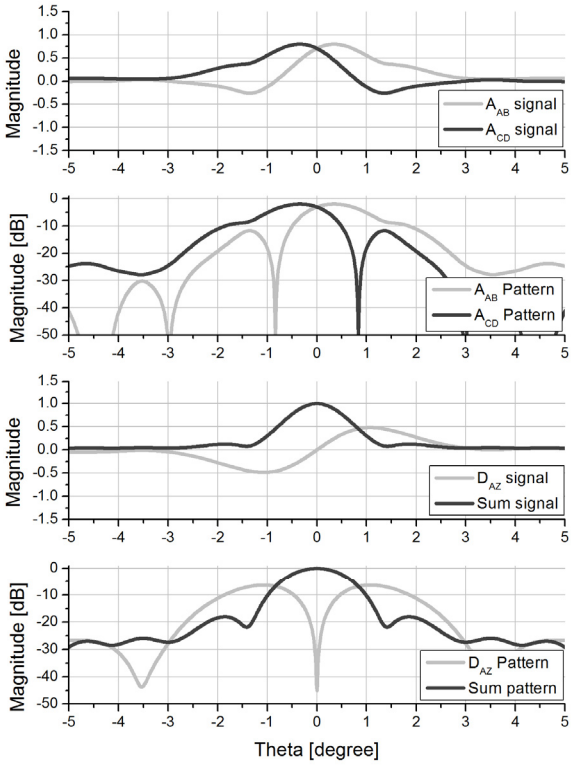

Fig. 2. Signal and radiating power patterns of A_{AB}, A_{CD}, S and D_{AZ}

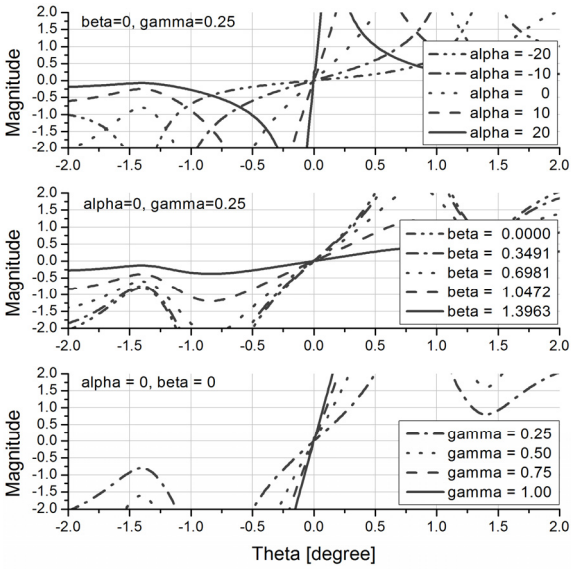

Fig. 3. Monopulse ratio curves with varying α, β and γ

3. 유전 알고리즘 기반 MR-C 선형구간 확장

모노펄스 기울기가 '1'인 경우, 모노펄스 시스템의 산출값이 곧 안테나 구동부 제어값이 되기 때문에 안테나 구동제어를 위한 별도의 연산을 할 필요가 없다. 따라서 본 논문에서는 기울기가 1인 선형 함수와 MR-C의 차이를 최소화하는 관점에서 최적화하였다.

MR-C의 선형구간은 기울기가 1인 선형 함수와의 RMS(Root Mean Square) 오차가 0.01 이하인 'θ' 범위로 정의하였다. 이에 따른 선형 함수와의 오차식은 다음과 같다.

$$E = RMS(\theta - U(\theta)) \tag{7}$$

모노펄스 기울기의 선형구간 확인을 위해서는 수식 (5)와 (6)의 산출값이 기울기가 '1'인 선형함수와 오차가 최소가 되도록 하는 최적의 'α', 'β' 그리고 'γ'값이 선택되어야 하며 동시에 수식 (7)을 만족하는 'θ' 범위를 확인하여야 한다. 본 논문에서는 다양한 변수를 갖는 함수의 최적화 문제 해결에 유용한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm)[5~7]을 사용하여 변수 최적화와 동시에 모노펄스 기울기의 선형구간을 확장하였다.

3.1 적용된 유전 알고리즘

Fig. 4는 수식 (5)와 (6)의 변수 최적화 및 선형구간 확인을 위한 유전 알고리즘의 흐름도를 보여준다. 유전 알고리즘을 위한 설정값 중, 교배(Crossover)와 돌연변이(Mutation) 확률은 각각 95 %와 5 %로 설정하였고, 초기 임의 생성 집단 인구 수와 선택 집단 인구 수는 각각 200과 100으로 설정하였다.

유전자 형성을 위한 각 변수(α, β, γ)의 유전자 길이는 8 Bit로 설정하였으며 아래 수식 (8)의 범위에 1:1 대응시켰다. 각 변수의 범위는 변수에 해당하는 시스템 구성 소자의 성능 및 참고문헌 [4]의 결과를 참조하여 설정하였다.

$$-30 \leqq \alpha \leqq 30 \tag{8-1}$$

$$0 \leqq \beta \leqq 2\pi \tag{8-2}$$

$$0.1 \leqq \gamma \leqq 1 \tag{8-3}$$

이에 따른 수식 (5)와 (6)의 유전자는 Fig. 5와 같이 형성된다.

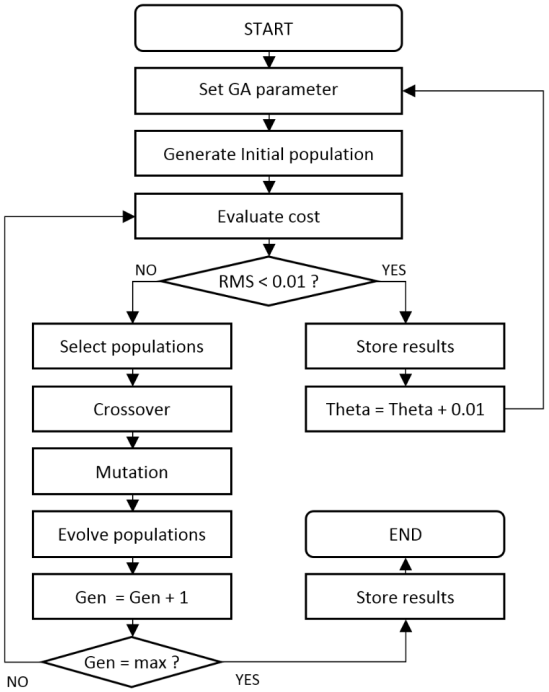

Fig. 4. Flow chart of the GA

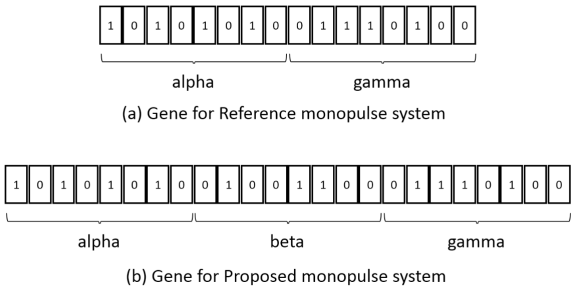

Fig. 5. Gene geometry

유전 알고리즘은 초기 임의 생성 집단 및 각 세대 집단에서 우수한 유전자를 선택하여 진화를 수행한다. 이때, 우수한 유전자만을 선택하게 되면 지역 수렴될 확률이 높아진다. 상기의 문제를 다소 해소하기 위해 다양한 선택 방법이 연구되어 왔다. 본 논문에서는 수식 (9)과 같이 선택 확률 축적 재정리가 적용된 순위 기준 룰렛 휠(Rank-based Roulette wheel) 방법을 사용하였다[8].

$$Rank_{Scaled} = (2 - SP) + 2(SP - 1)\left(\frac{N - Rank}{N - 1}\right) \tag{9}$$

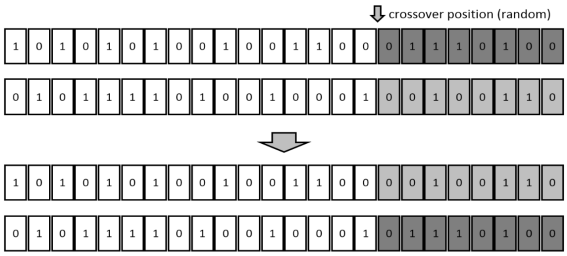

Fig. 6. Crossover

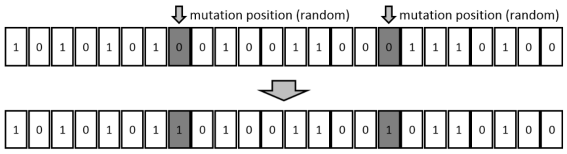

Fig. 7. Mutation

여기서 SP는 추적 재정리를 위한 상수로, 본 논문에서는 '1.6'으로 설정하였다. 그리고 N은 초기 임의 생성 집단 수 혹은 세대 집단 수이다.

교배는 선택 집단 중 임의의 2개 유전자의 유전자 정보를 교환하는 행위이다. 교배 결과에 의한 유전자의 적합도 가치가 더 우수하면 유전자는 교체 된다. 본 논문에서는 Fig. 6과 같은 1점 교배를 사용하였다.

돌연변이는 유전자의 임의 위치의 정보를 변경하는 행위로 광역 탐색의 기회를 증가시킨다. 본 논문에서는 Fig. 7과 같이 선택 집단 중 유전자 하나를 임의로 선택하고, 임의의 돌연변이 지점을 2군데 선택하여 유전자 정보를 변형하는 방법을 사용하였다. 돌연변이 결과에 의한 유전자의 적합도 가치가 더 우수하면 유전자는 교체된다.

3.2 유전 알고리즘 기반 2개 변수 최적화

Table 1은 수식 (5)와 Fig. 5(a)의 유전자 구성을 이용하여 'θ' 범위에 따른 최적화된 'α'와 'γ'값과 이에 따른 수식 (7)의 결과를 보여준다. 그리고 Fig. 8은 Table 1의 결과에 따른 MR-C를 보여준다.

Table 1 및 Fig. 8에서 알 수 있듯이, 합 및 차 신호 경로의 이득 차이(α)와 신호 처리부 계수값(γ)에 의해 모노펄스 기울기를 제어할 경우, $E \leq 0.01$을 만족하는 최대 선형 구간은 $-0.47 \leq \theta \leq 0.47$이고, 이때 오차값은 0.0098 임을 알 수 있다. 더불어 상기 조건을 만족하는 α_{opt}와 γ_{opt}는 각각 19.8824와 0.7067 임을 알 수 있다.

Table 1. Optimized α, γ and E with various θ

θ	α_{opt}	γ_{opt}	E
0.1	13.0588	0.3323	0.0028
0.2	19.8824	0.7507	0.0014
0.3	18.4706	0.6076	0.0060
0.4	21.0588	0.8315	0.0063
0.47	19.8824	0.7067	0.0098
0.48	20.8235	0.7801	0.0102

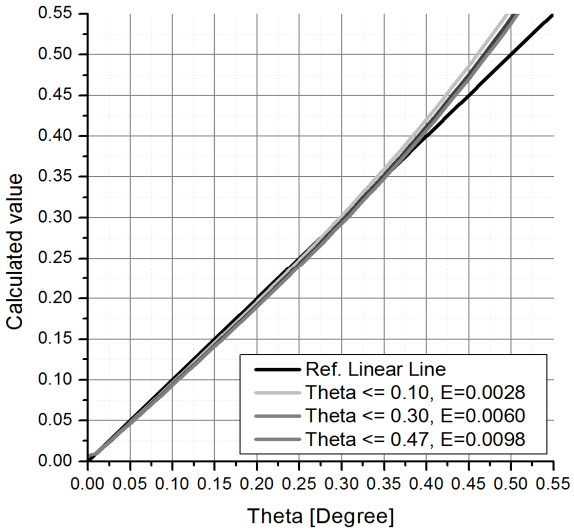

Fig. 8. Optimized monopulse ratio curves in reference monopulse system with various linear region (theta)

3.3 유전 알고리즘 기반 3개 변수 최적화

Table 2은 수식 (6)와 Fig. 5(b)의 유전자 구성을 이용하여 'θ' 범위에 따른 최적화된 'α', 'β' 그리고 'γ' 값과 이에 따른 수식 (7)의 결과를 보여준다. 그리고 Fig. 9은 Table 2의 결과에 따른 MR-C를 보여준다.

Table 2 및 Fig. 9에서 알 수 있듯이, 합 및 차 신호 경로의 이득 차이(α) 및 위상 차이(β)와 신호 처리부 계수값(γ)에 의해 모노펄스 기울기를 제어할 경우, $E \leq 0.01$을 만족하는 최대 선형 구간은 $-0.88 \leq \theta \leq 0.88$이고, 이때 오차값은 0.0092 임을 알 수 있다. 더불어 상기 조건을 만족하는 α_{opt}, β_{opt} 그리고 γ_{opt}는 각각 2.4706, 1.4045 그리고 0.5893 임을 알 수 있다.

Table 2. Optimized α, β, γ and E with various θ

θ	α_{opt}	β_{opt}	γ_{opt}	E
0.2	16.1176	0.1478	0.4902	0.0014
0.4	6.2353	1.4106	0.9416	0.0049
0.6	2.4706	1.3490	0.4534	0.0087
0.8	2.2353	1.3737	0.4902	0.0064
0.88	2.4706	1.4045	0.5893	0.0092
0.89	2.0000	0.9610	0.1525	0.0146

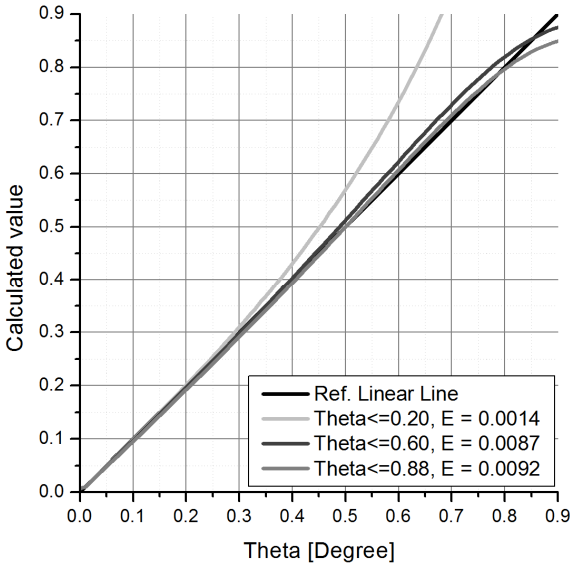

Fig. 9. Optimized monopulse ratio curves in proposed monopulse system with various linear region (theta)

4. 시뮬레이션 결과

Fig. 10은 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템에 있어, 기존 연구[4]의 구성(Reference SCACMS)과 본 논문에서 제안된 구성(Proposed SCACMS)에 따른 최대 선형 구간을 확보하는 모노펄스 기울기를 보여준다. 기존 연구[4]의 구성에 본 논문에서 제안한 합 및 차신호 경로 위상 차이(β)의 추가 구성에 따라 선형 구간을 더욱 확장할 수 있음을 알 수 있다.

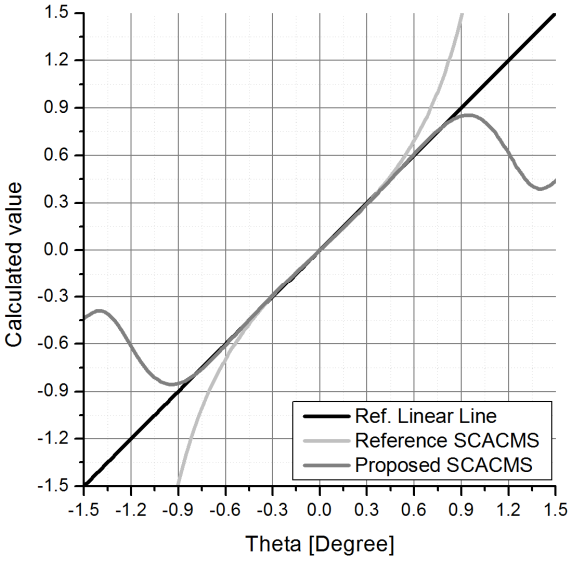

Fig. 10. Optimized monopulse ratio curves

도출된 MR-C 분석 결과에 따르면 기존 연구에 의한 구성과 본 논문에서 제안된 구성에 따른 최대 선형 구간은 각각 ±0.47°와 ±0.88°이다. 이는 추가 변수 최적화를 통해 선형 구간이 약 187 % 확장되었음을 뜻한다. 또한 유전 알고리즘 적용으로 인해 변수가 추가되었음에서 낮은 복잡도와 빠른 수렴을 보여줄 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 모노펄스 기울기를 변화 시키는 요인을 추가하고, 수식화와 GA 시뮬레이션 분석을 통해 선형 구간 확장이 가능하였음을 확인하였다.

개구 직경이 60λ인 ADE 안테나의 합 및 차 패턴을 이용하여 MR-C의 최대 선형 구간을 확인하였을 때, 기존 연구와 비교하여 약 187 % 확장 가능함을 확인하였다. 본 논문에서 제안된 단일채널 진폭비교 모노펄스 시스템의 구성을 사용할 경우, 최대 선형 구간의 확장이 가능하기 때문에, 추적 범위의 확장과 함께 높은 추적 정확도를 갖는 추적 시스템의 구현이 가능할 것으로 사료된다.

References

[1] Bassem R. Mahafza, “Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB,” CHAPMAN & HALL/CRC, 2000.

[2] G. RICHARD CURRY, “Radar Systems Performance Modeling,” ARTECH HOUSE, 2005.

[3] So-Su Kim, Kyung-whan Yeom, “Monopulse Slope Calibration in Frequency Agile Noncoherent Monopulse Systema,” KIEES, Vol. 18, No. 11, 2007.

[4] Jaesin Kim, Jinwoo Jung, Jae-Moon Lee, and Ui-Young Pak, “A Mathematical Perspective of Single-Channel Pseudo-Monopulse Tracking Receiver Design,” ICTC 2014, pp.874-875, 2014.

[5] J. H. Holland, “Adaptation in Natural and Artificial Systems,” University of Michigan Press, 1975.

[6] D. E. Goldberg, “Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning,” Addison-Weslet, 1989.

[7] J. E. Smith, “Operator and Parameter Adaptation in Genetic Algorithm,” Soft Computing, pp. 81-87, 1997.

[8] Noraini Mohd Razali, John Geraghty, “Genetic Algorithm Performance with Different Selection Strategies in Solving TSP,” WCE2011, Vol. II, 2011.