

광대역 마이크로파 광전송을 위한 전계흡수 광변조기 직렬연결 변조방식의 선형성

정회원 손성일*, 한상국*

Linearization scheme of serially connected EA modulator for broadband microwave optical transmission

Sung-Il Sohn*, Sang-Kook Han* *Regular Members*

요 약

광대역 마이크로파 신호의 광전송시 변조과정에서 발생하는 상호잡음 성분의 억제를 위한 다단 직렬구조의 전계흡수 광변조기를 이용한 선형화 방법을 제안하였고 이론적으로 고찰하였다. 바이어스 전압에 따른 신호의 위상 반전이 발생하는 것을 이용하여 두 개의 서로 다른 바이어스 전압과 입력 마이크로파 신호의 전력 차를 이용하여 광대역 시스템의 성능을 좌우하는 IMD2와 IMD3를 동시에 억압시킬 수 있었다. 모의실험을 통하여 최적의 동작 조건을 찾은 결과 35dB의 IMD2 억제와 50dB의 IMD3를 동시에 억압시킬 수 있었으며 이에 따라서 약 15dB의 동작영역의 증가를 얻을 수 있었다.

ABSTRACT

For analog optical transmission of broadband microwave signal, a linearization scheme using serially connected electroabsorption modulator is proposed and theoretically investigated. Using the out-of-phase condition of RF signal as, IMD2 and IMD3 are simultaneously suppressed by controlling two bias voltages and different input microwave power. Reduction of the second order intermodulation products of ~35dB and the third order intermodulation of ~50dB and the following increase of spurious free dynamic range of ~15dB were achieved from the proposed linearization scheme

I. 서론

급속히 증대되는 정보의 다양화에 따른 대역폭의 증가와 데이터의 초고속 전송을 위하여 광섬유를 이용한 유무선 통신 통합기술은 초고속 정보통신망의 중요한 응용분야로 부각되고 있다. 이러한 유무선 통합통신망의 초고속화와 광대역화의 일환으로 무선통신분야에서 폭발적으로 증가하고 있는 무선통신 가입자의 수용범위를 높이기 위한 방법으로 마이크로파 신호를 광신호를 변조하여 전송하는 기술이 부각되고 있다. 이러한 기술을 적용하게 될 경우

각 가지국에서 마이크로파신호 변환을 위한 추가적인 하드웨어가 불필요하게 되고 중계기의 소형화가 가능하게 된다. 그러나 다 채널의 마이크로파 신호를 부 반송파로 변조(SCM)하는 경우 광변조기의 비선형성으로 인한 상호변조 왜곡성분(IMD)은 광변환 링크의 신호 대 잡음비의 감소를 초래하게 되고 동작영역(SFDR)이 제한되게 된다^{1,2}. IMD 성분이 소자 자체의 비선형 출력성분의 정도를 알려주는 선형성 판단지수라고 할 경우 SFDR은 변조신호가 비선형 출력성분의 유발 없이 광변환되기 위한 입력 마이크로파 신호의 가용인가 전력의 범위를 나타낸다. 특히 광대역의 마이크로파 신호를 변조할 경우

* 연세대학교 전기·전자공학과 광통신연구실 (skhan@yonsei.ac.kr)

논문번호: 00349-0901, 접수일자: 2000년 9월 1일

* 본 연구는 정보통신부 선도기술 개발사업에 의해 지원되었음.

가장 큰 비선형 성분인 IMD2와 다음으로 큰 비선형 성분인 IMD3성분을 억제하기 위한 소자의 선형성 확보가 아날로그 광섬유 링크의 성능향상에 가장 중요한 부분을 차지하게 된다.

마이크로파 신호를 광신호로 변조하는 방법에는 레이저 다이오드를 이용한 직접 변조방식과 외부변조기를 이용하는 외부 변조방식이 있다. 그러나 레이저 다이오드를 이용하는 직접변조를 할 경우 과도현상에 의해서 발생하는 처핑에 따른 신호의 파장왜곡 현상을 최소화하기 위한 대안으로 외부 광변조기가 고속 광변환 링크에 적용된다. 외부변조기에는 LiNbO₃ MZI(Mach-Zehnder interferometer)와 전계흡수 광변조기가 AM-SCM 광전송장치로 적용될 수 있음이 보고되었다. 그러나 전계흡수 광변조기 전력 동작, 작은 크기 및 다른 반도체 소자와의 집적이 용이한 장점을 가지고 있기 때문에 광변환 링크에서 유용하다. 그러나 이 두 개의 변조기 모두 비선형적인 전달특성으로 인하여 선형화 과정이 요구된다.

제시된 선형화 방법으로는 외부 전기회로를 이용하는 방법(feedforward 방법, predistortion 방법)이 가장 먼저 제시되었는데 이 경우 회로의 복잡성 및 마이크로파 신호의 주파수가 높아짐에 따라 전기적 소자의 주파수 응답특성에 한계성을 가지게 된다^[34]. 따라서 외부 전기회로를 사용하지 않고 저 전력, 전광(all optical) 선형변조기의 구현이 아날로그 광변환 링크에 요구되고 제안된 방법으로는 두 개의 광변조기를 병렬로 연결하는 방법 및 2차 광원 인가에 의한 비선형 출력성분의 위상반전 개념 및 LiNbO₃ MZI구조에서의 선형화 방법 같은 억제 노력이 이론과 실험적으로 제시되었다^[5,9]. 그러나 병렬구조의 경우 간섭계를 사용하게 되어서 정확한 위상성분의 정합이 필요하게 되고 2차 광원을 이용하는 방법은 부가적인 입력광원 인가에 따른 광파장의 안정성 및 실제적인 광변환 링크 적용의 복잡성과 같은 문제점을 가지고 있다. 따라서 광변조기의 비선형 성분 억제 방법은 복잡하지 않고 주파수 응답에 큰 영향을 받지 않는 실제적인 광변환 링크에 적용 가능한 방법이 연구되어야 하는 실정이다.

본 논문에서는 광대역 마이크로파 광전송시 발생하는 상호잡음 성분을 억제하기 위해 두 개의 전계흡수 광변조기를 이용하여 비선형 성분을 억압하는 방법을 제안하고 이론적인 고찰을 하였다. 바이어스 전압에 따른 광변조기의 전달함수의 미분변화율의 부호 변화에 의한 위상반전을 이용한 비선형 성분

억제와 동시에 IMD2와 IMD3를 억제하기 위해 각각의 광변조기에 인가되는 입력 마이크로파 신호의 전력 비를 조절하여 광대역 동작영역의 증가를 고찰하였고 각각의 광변조기의 전달특성을 달리하여 동작조건에 따른 비선형 성분의 억제에 대하여 모의실험을 통한 이론적인 고찰을 하였다.

II. 전계흡수 광변조기의 비선형성 판단

전계흡수 광변조기의 전달함수는 지수함수 형태를 나타내고 식 (1)과 같으며 그림 1에 길이에 따른 전달함수를 나타내었다.

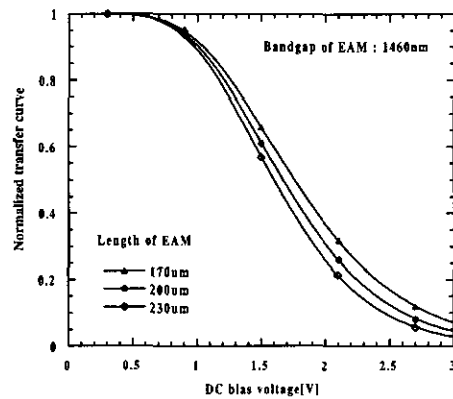


그림 1. 전계흡수 광변조기의 길이변화에 따른 전달함수의 변화

$$T(V) = \frac{P_{out}}{P_{in}} \exp[-\Gamma\alpha(V)L] \quad (1)$$

식 (1)에서 P_{in} 은 광 입력전력, Γ 는 광구속 계수, α 는 역 바이어스 전압에 따른 흡수계수, L 은 광변조기의 길이이다. 모의실험에 사용된 전계흡수 광변조기는 InGaAsP 흡수층을 지닌 deep ridge PIN 다이오드의 구조를 가진다. 흡수층의 밴드갭은 1.46 μ m, 입력 광신호의 파장은 1.55 μ m, 두께와 폭은 0.25 μ m, 3 μ m를 사용하였으며, 변조기의 길이는 200 μ m를 사용하였다^[10]. 전계흡수 광변조기의 비선형성을 알아보기 위해서 일반적으로 two-tone 마이크로파 신호를 바이어스 전압을 함께 인가하고 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$V = V_b [1 + m_0 (\cos w_1 t + \cos w_2 t)] \quad (2)$$

전달함수를 w_1, w_2 는 마이크로파 주파수를 나타내며 V_b 는 DC bias voltage, m_0 는 RF신호의 변조

깊이를 나타낸다. 각각의 마이크로파 신호들은 RF 혼합기에 의해서 묶여져 전계흡수 광변조기에 인가 되어 전광 변환되게 된다. 다음으로 광변조기의 비선형성을 분석하기 위해 Taylor series를 이용하게 된다. 비선형시스템의 정확한 분석을 위해서는 Volterra series가 적용되어야 하지만 전계흡수 광변조기는 memoryless한 특성을 가지기 때문에 비교적 간단한 Taylor series를 이용하여 비선형 성분을 예측할 수 있고, 식 (3)과 같이 전개될 수 있다.

$$T(V) = T(V_b) + \frac{V - V_b}{1!} T^{(1)}(V_b) + \frac{(V - V_b)^2}{2!} T^{(2)}(V_b) + \frac{(V - V_b)^3}{3!} T^{(3)}(V_b) \dots \quad (3)$$

식 (3)을 전개하였을 경우 우측 첫 항은 직류 성분을 나타내고 두 번째 항은 인가된 마이크로파 신호를 나타내게 되고 나머지 항들에 의해서 상호작용 성분을 나타내게 된다. 특히 세 번째 항은 비선형 성분중 가장 큰 IMD2에 가장 큰 영향을 미치게 되고 네 번째 항은 다음으로 큰 비선형 성분인 IMD3에 가장 큰 영향을 미치게 된다. 다시 말하자면 IMD2는 전달함수의 2차 미분변화율에 가장 큰 영향을 받게되고 IMD3는 전달함수의 3차 미분변화율에 가장 큰 영향을 미치게 되고, 전달함수의 미분변화율은 광변조기의 밴드갭, 길이 및 바이어스 전압에 영향을 받게된다. 인가된 마이크로파 신호에 따른 IMD2와 IMD3의 크기를 dBc단위로 나타낼 경우 각각 식 (4), 식 (5)와 같다.

$$IMD2 = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum w_1 \pm w_2 |power|}{w_1 \text{ or } w_2 |power|} \right] \quad (4)$$

$$IMD3 = 10 \log_{10} \left[\frac{\sum 2w_1 - w_2 \text{ or } 2w_2 - w_1 |power|}{w_1 \text{ or } w_2 |power|} \right] \quad (5)$$

그림 2와 그림 3에서는 전달함수의 2차, 3차 미분 변화율에 따른 IMD2와 IMD3를 나타내고 있다. 광 입력 전력은 1mW, 입력 마이크로파 신호의 변조깊이는 3%로 가정하였다. 그림 2와 그림 3에서처럼 IMD2와 IMD3가 각각 전달함수의 2차와 3차 미분변화율의 값이 최소가 될 경우 비선형 성분이 억압되게 된다. 또한 바이어스 전압에 따른 각각의 미분변화율이 서로 다르기 때문에 IMD2와 IMD3 성분은 동시에 억압될 수 없고 전달함수의 미분변화율은 바이어스 전압에 따라 서로 다른 부호를 가지게 되어 신호의 위상반전이 발생할 수 있음을 그림 2와 그림 3을 통해서 알 수 있다. 그래서 시스

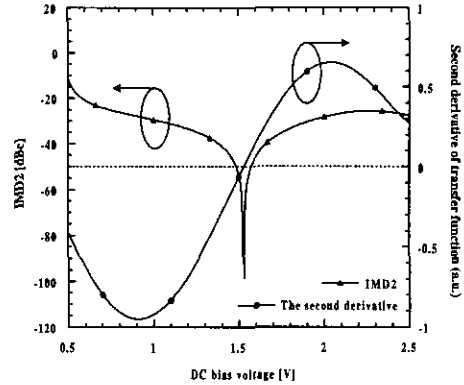


그림 2. 바이어스 전압에 따른 IMD2와 전달 함수의 2차 미분변화율

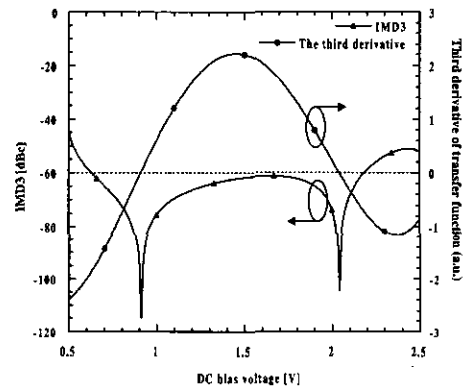


그림 3. 바이어스 전압에 따른 IMD3와 전달 함수의 3차 미분변화율

템의 성능을 좌우하는 동작영역의 결정은 가장 큰 비선형 성분을 억압시킨 후 다음으로 큰 비선형 성분의 크기에 의해서 결정되는데 광대역 시스템에서 동작영역을 증가시키기 위해서는 동시에 IMD2와 IMD3의 억제가 필요하게 된다.

II. 선형화 기법

그림 4는 제안된 다단 직렬구조의 전계흡수 광변조기의 구조를 나타내고 있다. 마이크로파 신호는

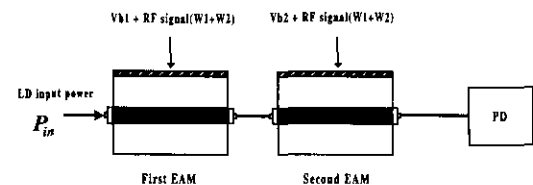


그림 4. 다단 전계흡수 광변조기를 이용한 선형화 구조

각각의 광변조기에 서로 다른 변조깊이를 가지고 나누어 인가된다. 이 경우 마이크로파 신호의 위상은 전송선로 길이의 조절에 의해서 같은 위상을 가지고 광변조기에 인가되고 두 개의 광변조기의 특성은 같다고 가정하였다. 레이저 다이오드에서 방출된 연속 광신호는 각각의 변조기에서 서로 다른 바이어스 전압과 서로 다른 전력을 갖는 마이크로파 신호에 의해서 변조가 되고 광 검출기에 의해서 수신되게 된다. 제안된 구조에서는 두 개의 바이어스 전압과 입력 마이크로파 신호의 전력차이를 이용하여 동시에 IMD2와 IMD3를 억압시키는 방법에 대하여 제안한다. 광대역 시스템에서는 IMD2가 가장 큰 비선형 성분이 되고 다음으로 큰 비선형 성분은 IMD3가 된다. 광대역 시스템에서의 동작영역은 IMD2를 억압하는 바이어스 전압에서 나머지 비선형성분인 IMD3의 전력의 크기가 동작영역의 결정에 가장 중요한 영향을 미치게 되어 동작영역을 증가시키기 위해서는 IMD2 억제 동작조건에서 IMD3를 같이 억제 시켜야만 시스템의 성능이 향상되기 때문이다.

위의 구조에서의 비선형성을 해석하기 위해서 입력 광출력에 대한 광출력을 Taylor series를 이용하여 전개할 경우 첫 번째 광변조기에서 발생하는 비선형 성분이 두 번째 광변조기에 영향을 미치게 되어 새로운 비선형 성분이 발생하게 된다. IMD2 성분은 각각의 광변조기에서 발생하는 성분과 전달함수의 각각의 광변조기의 전달함수의 1차 미분 변화율의 product에 의해서 새로운 비선형 성분이 발생하게 되고 이러한 성분들의 합으로 IMD2의 크기를 결정하게 된다. IMD3의 경우 전달함수의 1차 미분 변화율과 2차 미분변화율의 product에 의해서 발생하는 새로운 비선형 성분과 각각의 광변조기에서 발생하는 IMD3 성분의 합으로 크기를 결정하게 된다.

제안된 구조에서 광변조기 발생하는 IMD2와 IMD3를 동시에 억압하는 방법은 다음과 같다. 전달함수의 미분변화율은 바이어스 전압에 영향을 받게되고 이에 따라 서로 다른 부호를 가지게 된다. 그래서 변조된 신호의 위상반전을 이룰 수 있게되고 IMD2와 IMD3를 동시에 억압하기 위해서 두 개의 변조기에 적용되는 바이어스 전압과 서로 다른 마이크로파의 입력전력의 차를 이용하여서 비선형 성분을 억압하게 된다. 각각의 광변조기에 인가되는 마이크로파 입력전력의 차는 첫 번째 광변조기에 인가되는 마이크로파 신호의 변조깊이를 고정

시킨 후 두 번째 광변조기에 인가되는 마이크로파 신호의 변조깊이를 조절하여 모의실험을 하였다. 그래서 하나의 전계흡수 광변조기를 사용한 경우보다 성능이 좋아지는 조건을 찾은 후 최적화된 바이어스 전압조건과 입력전력의 차를 고찰하였다. 그림 5는 다단 전계흡수 광변조기를 사용할 경우 하나의 광변조기만을 사용하는 경우보다 선형성이 향상되는 동작조건을 첫 번째 광변조기에 인가되는 마이크로파 신호의 변조깊이를 3%로 고정된 후 각각의 바이어스 전압과 두 번째 광변조기의 변조깊이의 조합을 모의실험을 통하여 알아본 결과이다.

다음으로 이러한 동작조건 중에서 비선형 성분을 억압시키는 최적의 조건에서 IMD2와 IMD3의 억제 정도를 그림 6에 나타내었다.

모의실험 결과 각각의 광변조기의 바이어스 전압이 1.81V와 0.56V이고 두 번째 광변조기에 인가되는 마이크로파 입력 신호의 변조깊이가 첫 번째 광변

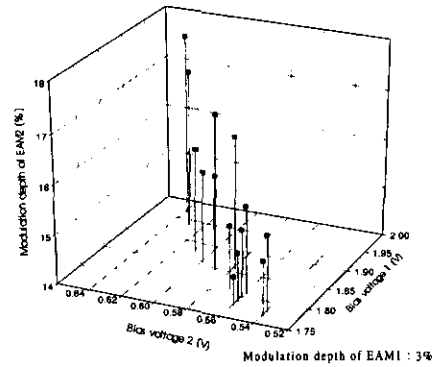


그림 5. 선형화 구조에서 비선형 성분이 억압 되는 조건

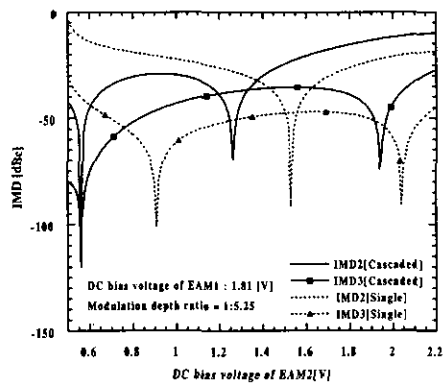


그림 6. 다단 전계흡수 광변조기를 사용할 경우 IMD성분의 억제정도

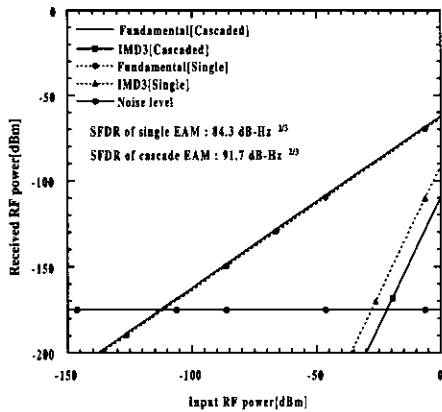


그림 7. 입력 RF 전력에 대한 수신된 기준 RF 신호전력과 IMD3전력

조기에 인가되는 입력 신호에 비해 5.25배 클 경우 새로운 IMD2 억제지점의 발생으로 인하여 동시에 IMD2와 IMD3가 억제되게 되었다. 그리고 하나의 광변조기만을 사용할 경우와 같은 입력 마이크로파 전력을 인가하게 될 경우에 비교하여 본 논문에서 제시한 선형화 방법을 이용하게 될 경우 IMD2는 40dB, IMD2 억제조건에서 IMD3는 53dB의 억제가 이루어졌다. 이러한 동작조건에 대하여 고찰해보면 각각의 바이어스 전압에서 전달함수의 2차, 3차 미분 변화율의 부호가 서로 다르게 되어 위상 반전된 IMD2와 IMD3 신호가 동시에 발생되게 되고 각각의 광변조기에 인가되는 입력 마이크로파의 크기 조절에 의해서 위상 반전된 신호의 크기 조절에 의해서 동시에 IMD2와 IMD3를 억압하게 된다. 그리고 이러한 최적화된 동작조건에서 약 7dB의 동작영역의 증가가 이루어졌다.

다음으로 두 번째 광변조기의 전달특성의 변화에 대한 비선형 억제 특성을 알아보기 위하여 광변조기의 밴드갭을 고정시킨 후 길이를 170 μ m에서 250 μ m까지 변화시키면서 비선형 성분의 억제를 알아보았다. 전계흡수 광변조기의 전달특성의 변화는 전달함수의 미분변화율 및 동작조건의 변화에 따른 신호의 크기에 영향을 주게 되는데 전달특성의 변화에 따른 선형화구조에서의 동작조건의 변화에 따른 비선형 성분 억압정도를 모의실험을 통하여 알아보고 동작영역의 증가는 두 번째 광변조기의 길이가 210 μ m일 경우 IMD2와 IMD3가 같은 동작조건에서 각각 35dB, 58dB 증가하게 되어 같은 전달특성을 갖는 구조를 사용할 경우보다 IMD3가 더 낮아지게 되어 약 15dB의 동작영역의 증가가 이루어졌고 그림 8과 그림 9를 통하여 알아보았다. 이 결

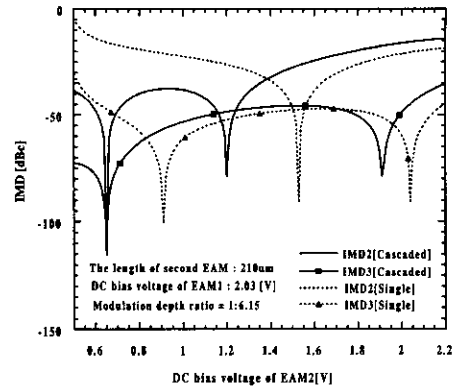


그림 8. 두 번째 광변조기의 전달특성의 변화에 따른 IMD성분의 억제정도

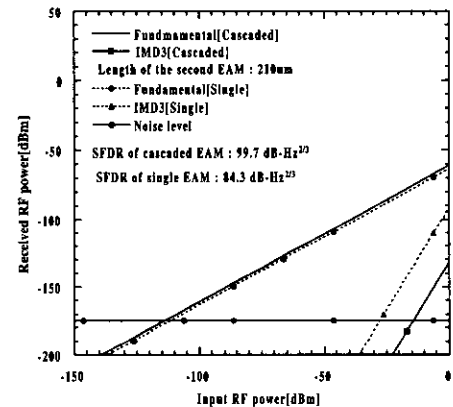


그림 9. 두 번째 광변조기의 전달특성 변화에 따른 수신된 기준 RF신호의 전력과 IMD3 전력

과 비선형 성분을 억압시키는 바이어스 전압이 각각 2.04V, 0.65V로 동작조건이 바뀌게 되고 두 번째 광변조기에 인가되는 마이크로파 입력 신호의 변조깊이가 첫 번째 광변조기에 인가되는 입력신호의 변조깊이에 비해 6.15배 클 경우 IMD2와 IMD3가 동시에 억압되게 된다.

IV. 결론

본 논문에서는 광대역 마이크로파 광전송을 위한 다단 직렬구조의 전계흡수 광변조기를 이용한 선형화 방법을 제안하였고 모의실험을 통하여 이론적인 고찰을 하였다. 제안된 구조는 전계흡수 광변조기의 바이어스 전압에 따라 신호의 위상반전이 일어나게 되고 두 개의 바이어스 전압과 각각의 광변조기에 인가되는 입력 마이크로파 신호의 전력의 차이를 이용하여 광대역 시스템의 성능을 결정짓는 IMD2

와 IMD3를 동시에 억압하게 된다. 또한 서로 다른 전달특성을 가지는 전계흡수 광변조기를 이용하는 경우 비선형 성분을 억압하는 동작조건이 낮은 구동 바이어스 전압으로 천이하게 됨을 볼 수 있었으며 ~35dB의 IMD2 감소 효과와 ~50dB의 IMD3 감소효과를 동시에 얻을 수 있었고 이에 따른 15dB의 동작영역의 증가를 얻을 수 있었다. 따라서 제안된 다단 직렬 변조방식의 전계흡수 광변조기 구조는 부가적인 전기 보상회로를 사용하지 않고 전계흡수 광변조기의 주파수 응답에만 제한을 받으면서 DC 바이어스 전압과 입력 마이크로파 신호의 전력 조절만을 이용하여 선형성을 향상시킬 수 있게 된다. 그리고 각각의 소자를 연결할 경우 발생하는 광전력 손실로 인한 동작영역 증가의 제한은 각각의 광변조기와 레이저 다이오드를 집적화 시킬 경우 광전력 손실을 최소화시킬 수 있고 송신단의 크기를 줄일 수 있게 되어 효율적인 광변조 시스템을 구현하리라 기대된다.

참 고 문 헌

[1] T. E. Darice and G. C. Bodeep, "Lightwave submariner CATV transmission systems", IEEE Transaction on Microwave Theory and Technique, Vol. 38, pp.524-533, 1990

[2] K. Emura, "Technological choices in optical fiber feeding wireless access systems", Technical Digest. MWP' 96, pp.333-357, 1996

[3] T. Iwai, K. Sato and K. I. Suto, "Signal distortion and noise in AM-SCM transmission systems employing the feedforward linearized MQW-EA external modulator", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 13, pp. 1606-1612,1995

[4] G. C. Wilson, T. H. Wood, M. Gans, J. L. Zyskind, J. W. Sulhoff, J. E. Johnson, T. Tanbun-Ek, and Paul A. Morton, "Predistortion of electroabsorption modulators for analog CATV systems at 1.55 μ m", IEEE Journal of Lightwave Technology, Vol. 15, pp. 1654-1662,1997

[5] S. K. Korotky, R. M. de Ridder, "Dual parallel modulation schemes for low distortion analog optical transmission", IEEE Journal on selected areas in communications, Vol. 8, pp. 1377-

1380, 1990

[6] G. W. Lee, S. K. Han, "Linear dual electroabsorption modulator for analog optical transmission", Microwave and Optical Technology Letters, Vol. 22, pp. 369-373, 1999

[7] K. K. Loi and J. H. Holidiak, "Linearization of 1.3 μ m MQW electroabsorption modulators using an all-optical frequency-insensitive technique", IEEE Photonics Technology Letters, Vol. 10, No. 7, pp-964-966, 1998

[8] G. E. Betts, "Linearized modulator for suboctave-bandpass optical analog links", IEEE Transactions on Microwave Theory and Technique, Vol. 42, pp. 2642-2649, 1994

[9] H. Skeie and R. V. Johnson, "Linearization of electro-optic modulators by a cascade coupling of phase modulating electrodes", SPIE integrated optical circuits, Vol. 1583, pp. 153-163, 1991

[10] 한 섭, 한상국, "InGaAsP 전계흡수 광변조기 최적설계에 관한 연구", 대한전자공학회 논문지, 제 34권, D편, 83-89쪽, 1997

손 성 일(Sung-II Sohn)

정회원



1999년 2월 : 광운대학교 전자공학과 졸업(학사)
1999년3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 석사과정
<주관심 분야> 광통신 공학

한 상 국(Sang-Kook Han)

정회원



1986년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(학사)
1994년 8월 : Univ. of Florida, E. E. (석, 박사)
1996년 3월~현재 : 연세대학교 전기전자공학과 부교수
<주관심 분야> 광통신 부품 및 시스템