

SAW Convolver를 이용한 스펙트럼 확산통신 방식에 관한 연구

A Study on Spread Spectrum Communication Techniques Using SAW Convolver

* 黃金燦 (Keum Chan Whang)

** 崔永昊 (Young Ho Choi)

*** 田啓石 (Kye Suk Jun)

要 約

본 논문에서는 종래의 디지털 신호 처리 방식에 비해 소형이며 광대역폭 신호를 처리할 수 있는 AE 콘벌버가 스펙트럼 확산통신 방식에서 높은 신호처리 이득과 다이내믹 레인지 를 갖는 프로그램이 가능한 정합필터로 사용 될 수 있음을 실험적으로 제시하였다.

본 실험에서 사용한 AE 콘벌버는 안전재료 인 YZ-LiNbO₃ 위에 중심 주파수 50 MHz, 대역폭 11MHz 인 SAW 지연선을 제작하고 그 위에 저항율 50 ohm-cm인 P형 실리콘을 장착하여 구성하였으며, 이 소자는 63칩 PN 코드로 변조된 PSK 신호를 인가하여 신호처리 이득이 18 dB인 프로그램이 가능한 정합 필터로 사용될 수 있음을 보였다.

ABSTRACT

In this paper, it is presented experimentally that an Acousto-electric (AE) convolver, which is much smaller in size

and able to process wider bandwidth signals than conventional digital signal processing systems, can be used as a programmable matched filter that gives high processing gain and dynamic range in a spread spectrum communication system.

In experiment, a surface acoustic wave(SAW) delay line of its center frequency 50 MHz and band width 11 MHz is fabricated on a YZ-LiNbO₃ substrate and an AE convolver is assembled by mounting a p-type silicon strip of its resistivity 50 ohm-cm on the SAW delay line with small airgap.

This device has shown to be used as a programmable matched filter with 18dB processing gain when binary PSK signals modulated by 63-chip PN code are applied.

1. 서 론

스펙트럼 확산 통신 방식(Spread Spectr -

* 正會員, 延世大學校 工科大學 電氣工學科 教授

** 正會員: 延世大學校 電氣工學科

*** 正會員, 慶熙大學校 工科大學 電子工學科 教授

um Communication System; SS Communication System) 은 송신단에서 정보신호의 대역폭 확산시키는 방법과, 수신단에서 스펙트럼 확산된 정보신호를 재생시키는 방법으로 구성되는데 SS 통신방식에서는 PN코드 발진기(Pseudonoise Code Generator ; PN Code Generator)를 이용한 코드변조를 통해 정보신호의 대역폭을 확산시키며 PN코드를 프로그램함으로써 정보신호에 대한 도청과 제밍(Jamming)을 방지한다. 따라서 SS 통신 방식의 수신단에서는 이러한 기능을 수행할 수 있는 프로그램이 가능한 정합필터(Programmable Matched Filter)를 필요로 한다. 현재 디지털 컴퓨터(Digital Computer)를 이용하는 경우 디지털 신호처리 시스템(Digital Signal Processing System)은 처리 속도가 늦어서 VHF대의 신호를 직접 처리할 수 없는 반면에 SAW(Surface Acoustic Wave) 콘벌버(Convolver)는 수백 MHz 까지의 광대역 신호를 처리할 수 있으므로, 신호처리이득(Processing Gain)이 높은 정합필터를 구성할 수 있고, VHF대의 SS 통신 방식을 구성하는 중요한 소자로 이용될 수 있다.

SAW 콘벌버는 탄성 콘벌버와 음향전기(Acoustoelectric ; AE) 콘벌버로 나눌 수 있는데 탄성 콘벌버는 1969년 L.O.Svaasand¹⁾에 의해 최초로 발표된 이후 Thompson과 Quate²⁾, Lukkala와 Kino³⁾ 등에 의해 연구되어 왔으며, AE 콘벌버는 1972년 W.C. Wang⁴⁾에 의해 발견되었는데 탄성 콘벌버보다 콘벌루션(Convolution) 출력이 강하다는 장점 때문에 최근에 활발히 연구되고 있다.

본 연구에서는 중심 주파수 50 MHz이고 대역폭 11MHz인 광대역 인터디지털변환기(Wideband Interdigital Transducer ; IDT)를 압전재료인 YZ-LiNbO₃ 위에 최적 설계하여 SAW 지연선을 제작하고, 그 위에 반도체를 장착하여 AE 콘벌버를 구성한 다음 두 입

력신호의 콘벌루션 연산과 자동상관(Autocorrelation) 연산이 가능함을 보이고자 하며, 이 AE 콘벌버가 SS 통신 방식에서 프로그램이 가능한 정합필터로 쓰일 수 있음을 제시 하고자 한다.

2. AE 콘벌버를 이용한 SS 통신 방식

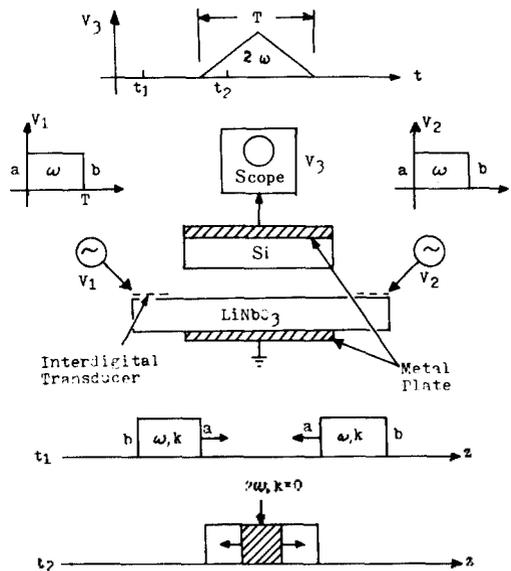
2-1. AE 콘벌버의 이론

두 입력신호에 대한 콘벌루션은 다음과 같다.

$$\int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot V_2(t-\tau) d\tau \quad (2-1)$$

고로 콘벌루션연산은 시간 변이(Time-Shifting), 곱셈연산(multiplication) 및 적분연산(Integration)으로 표시되는데 AE 콘벌버는 한 소자내에서 이러한 연산을 연속적으로 수행하여 두 입력신호에 대한 콘벌루션 출력을 얻을 수 있다.

(그림 2-1)에서 시간 변이는 V₁, V₂를 서로 반대 방향으로 진행하는 SAW를 지연선 양단에 증착된 두 IDT에 여기(Excited)함으로써 얻을 수 있고, 곱셈 연산은 두 IDT에서 여겨진 SAW의 전계가 공극(Airgap)을 통하여

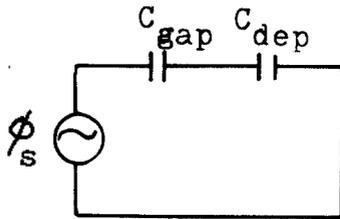


<그림 2-1> AE 콘벌버의 동작원리

<Fig 2-1> Operation of AE Convolver

반도체와 결합함으로써 반도체의 비선형성에 의해 구해진다. 그리고 반도체 내부에 여기된 신호는 반도체위에 증착된 전극에 의하여 공간적으로 적분되므로써 콘벌루션 출력을 얻게 된다.

따라서 반도체의 길이와 같은 구형펄스(Rectangular Pulse)를 두 입력신호로 인가하면, 전극의 길이, 즉 적분 길이내에서 인가한 두 신호의 겹치는 부분의 크기에 따라 콘벌루션 출력이 커지게 되며, 두 신호가 완전히 겹쳤을때 콘벌루션 출력은 (그림 2-1)과 같이 최대가 된다.



<그림 2-2> AE 콘벌버의 등가회로
<Fig 2-2> Equivalent Circuit of AE Convolver

AE 콘벌버는 압전재료의 아랫부분에 증착된 전극과, 절연재료인 압전재료, 그리고 공극위에 반도체를 놓은 MIS (Metal Insulator Semiconductor ; MIS) 구조로서, 등가회로는 (그림 2-2)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 공극 캐패시턴스(Airgap Capacitance ; Cgap)와 공핍층의 캐패시턴스(Capacitance of Depletion Layer ; Cdep)는

$$C_{dep} \approx \epsilon_0 / \ell$$

$$C_{gap} \approx \epsilon_0 / h \quad (2-2)$$

여기서 ϵ_0 : 유전율 ℓ : 공핍층의 두께
 h : 공극의 폭

가 되며, 이때 두 IDT에서 여기된 V_1, V_2 는 SAW로 변환되므로 두 입력은,

$$E_{s1} \propto V_1(t-z/v) \exp(j\omega_1(t-z/v))$$

$$E_{s2} \propto V_2(t+z/v) \exp(j\omega_2(t+z/v)) \quad (2-3)$$

가 되며, 이 전계는 공극을 통하여 반도체와 선형결합(Linear Coupling)되어 반도체의 공핍층에 표면전위를 유기한다. 이때 반도체 공핍층의 표면전위(Surface Potential)와 표면전계(Surface Electric Field)의 비선형 관계는, MIS 구조의 표면전계와 표면전위를 나타내는 포아송(Poisson) 방정식으로 부터 다음식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{1}{2} E_s^2 = k T n_0 / \epsilon_0 (\exp(q/kT) - q\phi_s/kT - 1 + \frac{n_i^2}{n_0} (\exp(-q\phi_s/kT) + q\phi_s/kT)) \quad (2-4)$$

여기서 ϕ_s : 표면전위
 E_s : 표면전계

식(2-4)로부터 표면전위(ϕ_s)는 반도체 표면에서 SAW전계 값의 2차함수로 표시될 수 있다.

$$\phi_s = aE_s + bE_s^2 \quad (2-5)$$

따라서 반도체의 비선형 작용으로 두 신호의 곱에 비례하는 다음과 같은 형태의 전위(ϕ_s)를 나타낼 수 있다.

$$\phi_s \propto E_{s1} \cdot E_{s2} \propto V_1(t-z/v) \cdot V_2(t+z/v) \exp j((\omega_1+\omega_2)t - (\omega_1-\omega_2)z/v) \quad (2-6)$$

여기서 z : 진행방향

v : 표면파 속도

여기서 만일 두 입력신호의 주파수가 같으면($\omega_1 = \omega_2$), 공핍층에 발생된 전위에 의해 반도체위에 증착된 전극에 나타나는 출력전압은 공간적으로 균일하므로($k=0$), 공간적으로 적분되고 용량적(Capacitively)으로 검출되므로,

$$V_{op} = A \exp(2j\omega t) \int_{-L/2}^{L/2} V_1(t-z/v)$$

$$v) \cdot V_2(t+z/v) dz \quad (2-7)$$

여기서 L: 반도체의 길이

가 된다. 여기서 입력신호의 지속시간과 표면파의 속도(V)의 곱이 L보다 작으면 식(2-7)의 적분 구간을 무한대로 취급할 수 있고 $\tau = t - z/v$ 변환에 의해 식(2-7)을 변형하면,

$$V_{op} = A \exp(2j\omega t) \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot V_2(2t-\tau) d\tau \quad (2-8)$$

가 된다. 여기서 V_{op} 는 두 입력신호가 시간적으로 2배 압축된 콘벌루션 출력이다. 따라서 AE 콘벌버는 디지털 신호(Digital Signal)를 아날로그(Analog) 형태로 연산할 수 있음을 보였다. 또한 입력신호를 전자적 방법을 사용하여 임의로 바꿀 수 있으므로 AE 콘벌버는 어댑티브 선형필터(Adaptive Linear Filter)로서의 구현이 가능하다.

2-2. SS 통신 방식을 위한 정합필터.

SS 통신 방식의 수신단에서 S/N 비(Signal to Noise Ratio)를 높이기 위해 자동상관(Autocorrelation) 정합필터를 많이 사용한다. 식(2-1)에서 AE 콘벌버의 두 입력신호중 한 신호를 시간반전(Time Reversed)시켜서 ($V_2(t) = V_1(-t)$) AE 콘벌버의 입력으로 인가하면 다음과 같이 두 입력신호에 대한 자동상관 함수로 나타난다.

$$V_c = \int_{-\infty}^{\infty} V_1(\tau) \cdot V_1(\tau-t) d\tau \quad (2-9)$$

식(2-9)를 일반적으로 표시하면, AE 콘벌버는 외부신호(External Signal; V_e)와 이를 시간반전시킨 기준신호(Reference Signal; V_r)를 상관(Correlation)시키는 소자로 다유식으로 나타난다.

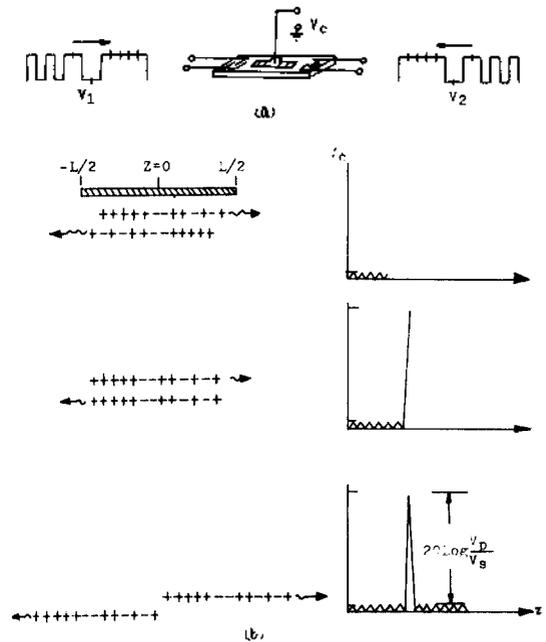
$$V_c = \int_{-\infty}^{\infty} V_e(\tau) \cdot V_r(\tau-t) d\tau \quad (2-10)$$

따라서, AE 콘벌버는 입력신호중 한 신호를 시간반전시켜 인가함으로써 어댑티브상관 소

자(Adaptive Correlator Device)로 사용할 수 있다.

PN 코드로 변조한 스펙트럼 확산된 PSK 신호를 사용하는 SS 통신 방식의 수신단에서 AE 콘벌버를 정합필터로 사용할 경우, 외부신호와 이를 시간반전시킨 기준신호를 AE 콘벌버의 양 입력에 인가하면 자동상관 출력이 나타나는데, (그림 2-3)은 그 한 예로 13비트(bit)로 코드된 입력을 AE 콘벌버의 양 입력에 인가할 경우 자동상관 과정을 나타낸다.

(그림 2-3) (a)와 같이 V_1 으로써 13비트 신호를 인가하고, V_2 는 V_1 을 시간반전시켜 AE 콘벌버의 양 입력에 인가하면 자동상관 출력은 (그림 2-3) (b)와 같으며, 모



<그림 2-3> 13비트로 코드된 입력의 자동상관
<Fig 2-3> Autocorrelation of 13 bit Coded Inputs

든 비트가 완전히 겹쳤을 경우에 자동상관 출력은 최대가 된다. 이때 최대전압(V_p), 사이드로우브(Sidelobe) 전압(V_s)에 대한 이득은,

$$20 \log (V_p / V_s) \quad (2-11)$$

이 되며, 시간폭이 소자의 신호처리이득(Processing Gain; G_p)만큼 압축된 자동상관 출력을 얻을 수 있다. 여기서 AE 콘벌버의 신호

처리이득은 다음 식으로 쓸 수 있다.

$$G_p = BT = 10 \log n \quad (2-12)$$

여기서 B : 콘벌버의 대역폭

T : L/V (반도체의 길이 / 표면파의 속도)

n : 코드화된 입력신호의 매비트당 칩(Chip) 수

따라서 SS 통신 방식에서 AE 콘벌버를 자동 상관 출력을 얻는 정합필터로 사용할 경우 백색잡음(White Noise)을 포함한 입력 신호가 인가되면 출력 S/N 비는, $N \gg S$ 일 경우,

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = \left(\frac{S}{N}\right)_{in} + G_p \text{ (dB)} \quad (2-13)$$

가 되며, 여기서 $(S/N)_{in} = -J/S$ 이므로 식(2-13)은,

$$\left(\frac{S}{N}\right)_{out} = G_p - J/S \text{ (dB)} \quad (2-14)$$

여기서 J : 재밍 스톱스레드(Jamming Threshold)가 되는데, 이때 출력에서 백색잡음은 상관되지 않으므로(Uncorrelate) 나타나지 않고 신호처리이득이 높은 자동상관된 출력만 수신 레벨(Level)에 나타나므로, 재밍 임뮤니티(Jamming Immunity)를 증가시킬 수 있다.

한편 기준신호의 PN 코드를 지정(Address)해서 바꾸어줌으로써 프로그램이 가능한 정합필터를 구현할 수 있다.

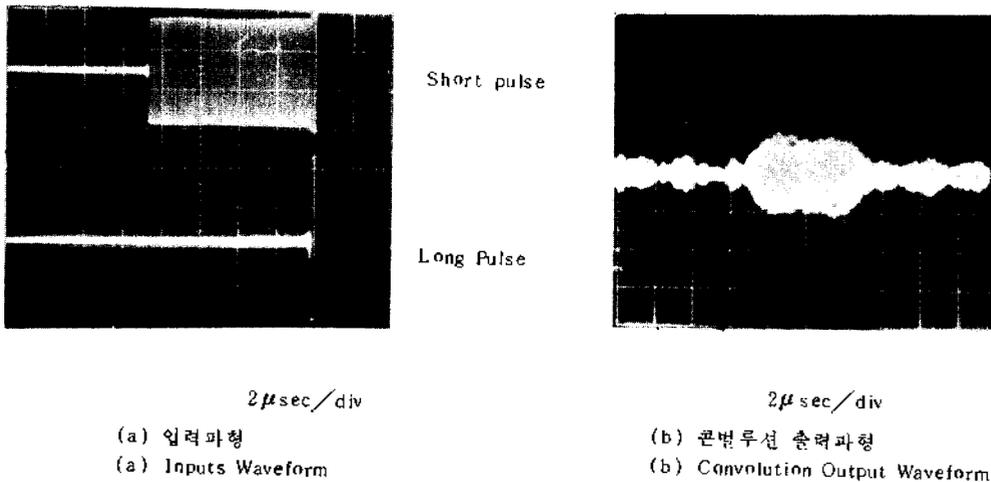
3. 실험 및 고찰

3-1. AE 콘벌버의 제작 및 측정

SAW 지연선의 양전재료는 크기가 $2 \times 1 / 4 \times 4 / 10$ (Inch)인 YZ-LiNbO₃를 사용하였고, 중심 주파수 50 MHz, 전극수 4 쌍, 전극의 겹치는 부분이 3mm인 IDT를 설계하여 마스크(Mask)를 제작하였다. 순도 99.9%인 알루미늄을 포토리도그래피(Photolithography) 방법으로 약 1,000Å 두께로 증착하여 지연선을 제작하여 알루미늄 장착 장치에 고정시켰으며, 실버 에폭시(Silver Epoxy)를 이용하여 알루미늄선으로 IDT와 BNC 콘넥터(Connector)를 연결하였다.

실리콘 웨이퍼(Silicon Wafer)와 지연선의 표면을 깨끗이 닦아서 먼지를 제거한 뒤 비저항을 $50 \Omega \cdot cm$ 인 P형 실리콘 웨이퍼를 지연선의 중앙에 중심이 일치하도록 올려 놓았다.

알루미늄 선으로 실리콘 웨이퍼와 출력측 BNC 콘넥터를 연결하고, 연한 스펀지교부(Sp-



<그림 3-1> 공극의 균일성 시험

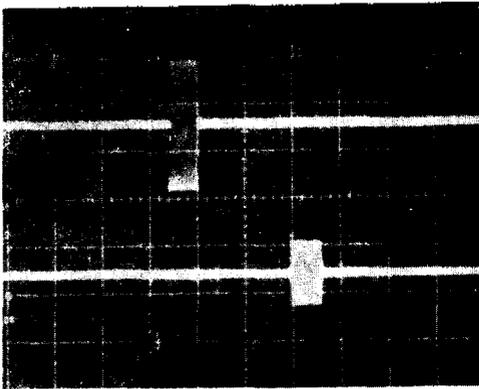
<Fig 3-1> Test of Airgap Uniformity

ong Rubber)를 실리콘 웨이퍼위에 얹어 놓은후, 다시 유리판을 올려놓고 알미늄 지주를 통하여 여러개의 나사로 유리판을 눌러서, 실리콘 웨이퍼가 지연선과 최적 공극을 유지하도록 조절하였다.

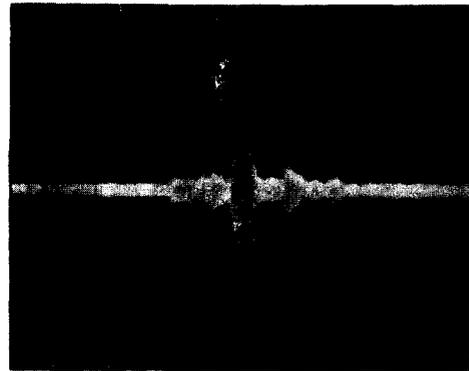
이와같이 구성된 AE 콘벌버에서, 공극의 균일 정도를 시험하기 위하여 지속시간이 긴 펄스(Long Pulse)와 짧은 펄스(Short Pulse)를 RF 로 변조한 V_1, V_2 의 입력신호를 인가하여 콘벌루션 출력을 관찰하였다.

이때 콘벌루션 출력 파형은 공극의 불균일 정도에 따른 진폭 변동을 나타내므로 파형을 관찰하면서 가능한 한 균일한 공극을 유지하도록 나사를 조절하였다(그림 3-1).

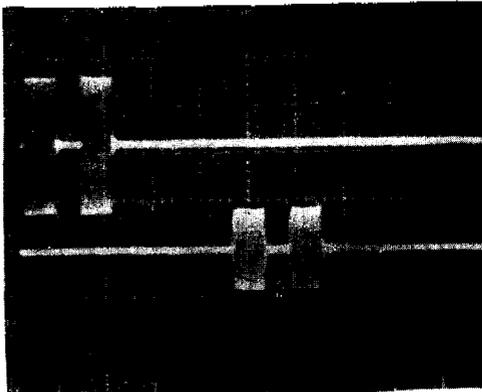
공극을 균일하게 조절한 후 단일펄스(Single Pulse) 및 2중펄스(Double Pulse)로 변조한 50MHz의 입력신호를 인가하여 콘벌루션 출력을 얻었으며, 입력과 출력파형은(그림 3-2)와 같다.



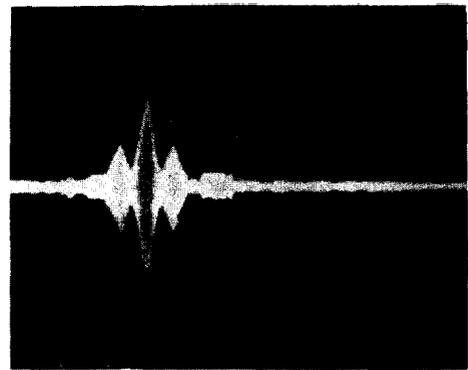
(a) $2\mu\text{sec}/\text{div}$



(b) $2\mu\text{sec}/\text{div}$



(c) $2\mu\text{sec}/\text{div}$



(d) $2\mu\text{sec}/\text{div}$

- (a) 단일펄스로 변조된 입력파형과 지연 특성
상측 : 지연선의 입력
하측 : 지연선의 출력

- (a) Single Pulse Modulated The Delay Line Output
Upper Trace : Input of Delay Line
Lower Trace : Output of Delay Line

- (b) 단일펄스로 변조된 두 입력파형의 콘벌루션
(b) Convolution of Single Pulse Modulated Inputs Waveform
- (c) 더블펄스로 변조된 입력파형과 지연 특성

상축 : 지연선의 입력
 하축 : 지연선의 출력

(c) Double Pulse Modulated Input Waveform and The Delay Line Output

Upper Trace : Input of Delay Line.
 Lower Trace : Output of Delay Line

이때 지연시간은 단일펄스의 경우 $4\mu\text{sec}$ 이며, 2중펄스의 경우는 $6\mu\text{sec}$ 로 나타났으며 진폭은 약 14dB 감소하였다. 또한(그림 3-2)에서 콘벌루션 출력은 SAW지연선의 입력과 출력 증상에 나타난다.

3-2. AE 콘벌버를 이용한 정합필터의 특성 및 결과고찰.

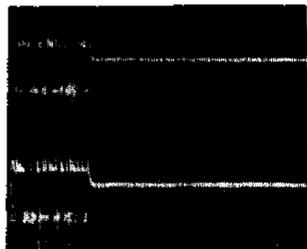
AE 콘벌버가 스펙트럼 확산 통신 방식에서 정합필터의 일종인 자동상관 시스템으로 사용될 수 있음을 보이기 위하여 50MHz RF신호를 63 칩(Chip) PN 코드로 스펙트럼 확산시킨 PSK 기준신호와 이 기준 신호를 시간반전시킨 신호를 AE 콘벌버의 양 입력단에 인가하여 자동상관 출력을 관찰하였다.

본 실험에서 설계, 제작한 PN 코드 발생기의 규격은 <표 1>과 같다.

<표 1>. PN 코드 발생기의 규격

<Table 1>. Specification of PN Code Generator.

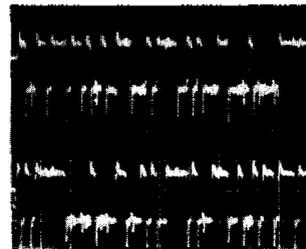
Data Rate	175 Kbits/sec
Clock Rate	11 MHz
PN Sequence 주기	1 msec
Data당 Chip Number per 1 bit	63 Chips



(a) 63 칩 PN 코드
 (a) 63 chip PN code

2 μsec /div

Time Reversed Signal



(b) 확장시켜본 PN 코드
 (b) Extended PN Code

2 μsec /div

<그림 3-4> PN 코드 파형

<Fig 3-4> PN code waveform

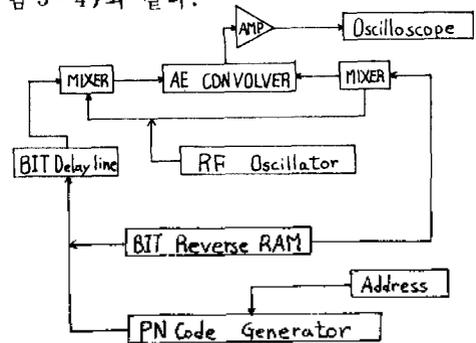
(d) 더블펄스로 변조된 두 입력파형의 콘벌루션 (d) Convolution of Double Pulse Modulated Inputs Waveform.

<그림 3-2> 콘벌루션 출력 파형

<Fig 3-2> Convolution Output Waveform

PN 코드의 길이를 반도체의 길이, 즉 적분 구간보다 짧은 범위 안에서 임의로 조절할 수 있도록 설계하였으며 임의로 조절할 수 있도록 설계하였으며, 어답티브 상관 시스템에서 프로그램이 가능하도록 코드를 지정할 수 있어야 하나, 본 실험에서는 같은 PN 코드가 반복되는 고정된 신호를 사용하였다.

본 실험에서 사용한 측정장치의 구성은(그림 3-3)과 같고, 63 칩 PN 코드의 파형은(그림 3-4)와 같다.



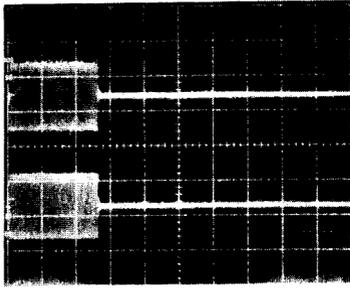
<그림 3-3> 측정 회로

<Fig 3-3> Measurement Circuit.

<그림 3-5>의 (a)는 <그림 3-4>의 63 칩 PN 코드에 의해 스펙트럼 확산된 PSK 신호이며 두 신호를 AE 콘벌버의 양 입력단에 인가하여 <그림 3-5>의 (b)와 같은 자동상

<그림 3-4> PN 코드 파형

<Fig 3-4> PN code waveform



2 μ sec / div

(a) PSK 입력파형

(a) PSK Inputs Waveform

Upper Trace : External Signal

Lower Trace : Reference Signal <Time-Reversed>



2 μ sec / div

(b) 자동상관 출력파형

(b) Autocorrelation Output Waveform

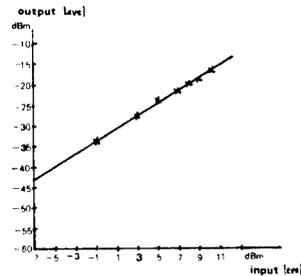
<그림 3-5> 자동상관 출력파형

<Fig 3-5> Autocorrelation Output Waveform

관 출력을 얻었다. <그림 3-5>의 (b)에서 소자의 신호처리 이득만큼 압축된 자동상관 신호를 볼 수 있으나 스퍼리어스 신호(Spurious Signal)가 비교적 크게 나타나 있음을 알 수 있다. 스퍼리어스 신호는 지연선상의 SAW 신호의 반사, 회절 또는 실리콘과 결합된 전계의 상호작용에 기인하며, 지연선 양단에 반사 흡수체를 설치하고 광학을 최적으로 조절함으로써 제거할 수 있다.

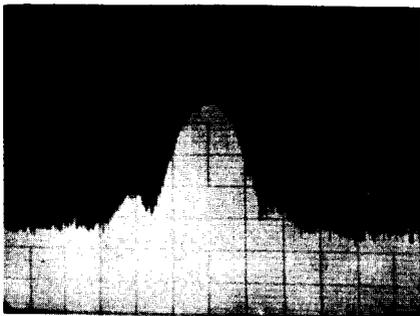
자동상관 출력은 PSK 입력에 대하여 대략 선형적으로 변화하였는데, (그림 3-6)이것은 반도체와 선형적으로 결합된 SAW 전계에 의

해 반도체에 유기된 공진층에서의 비선형특성이 소신호에 대하여서는 선형적으로 나타나기 때문인 것으로 생각된다.



<그림 3-6> 입력과 출력의 관계

<Fig 3-6> Plot of Input vs Output

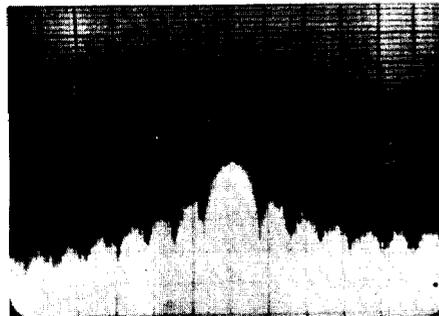


10 dB/div

50 MHz 5 MHz / div

(a) 지연선의 주파수 응답

(a) Frequency Response of SAW Delay Line



10 dB/div

50 MHz 5 MHz / div

(b) PSK 신호의 스펙트럼

(b) Spectrum of PSK Signal

<그림 3-7> 주파수 응답

<Fig 3-7> Frequency Respon

본 실험에서 제작된 AE 콘벌버의 3dB 대역폭은 약 11MHz로, 중심 주파수의 약 25% 이었다. (그림 3-7 (a))

PSK 신호의 스펙트럼(Spectrum) 분포를 (그림 3-7 (b)) SAW지연선의 주파수 응답과 비교하면 제작된 AE 콘벌버는 입력신호의 모든 에너지를 처리하지는 못하지만 정보전달에 충분한 대역폭을 처리함을 알 수 있다. 한편 제작된 소자의 신호처리 이득은 실리콘 웨이퍼에서의 신호처리시간이 $5.7\mu\text{sec}$ 이므로 약 18dB이고, 본 실험에서 사용한 PN 코드의 칩수 63과 일치하였다.

4. 결 론

AE 콘벌버를 제작하고, 63칩 PN코드로 변조한 스펙트럼 확산된 PSK 신호와 이를 시간반전시킨 기준신호를 인가하여 신호처리이득이 약 18dB인 어답티브 상관 소자를 실현하였으며, AE 콘벌버가 SS 통신 방식에서 자동상관 출력을 얻는 정합필터로 쓰일 수 있음을 보였다.

이때 AE 콘벌버의 사용 주파수를 높여서 소자의 대역폭을 넓히고, 반도체의 길이, 즉 적분 구간을 길게 함으로써 실제 SS 통신 방식에서 필요로 하는 신호처리이득(약 30 dB)을 얻을 수 있으며, 따라서 방해신호 및 백색잡음에 대한 임뮤니티(Immunity)를 높히게 된다. 또 PSK 신호의 PN 코드를 프로그래밍하여 변화시킴으로써 비밀통신의 보안성을 높히게 된다.

그러나 이러한 소자에서는 기준신호와 외부신호가 실리콘 아래에서 정확히 마주치도록 두 입력신호의 정확한 타이밍(Timing)이 요구되며, 입력신호중 하나를 시간반전 시켜야하는 어려움이 있다. 이를 해결하기 위해서 기준신호를 반도체에 기억시키고 읽을 수 있는 기억상관 소자(Storage Correlator Device)⁵⁾에 대한 연구가 요구된다.

감사의 말씀

본 연구는 한국 과학 재단의 1981년도 학술연구비 지원으로 이루어졌으며, 한국과학재단에 깊은 감사를 드립니다.

REFERENCE

1. L.O. Svaasand ; "Interaction between Elastic Surface Waves in Piezoelectric Materials," Appl. Phys. Lett., Vol. 15, p 30, (1969).
2. C.F. Quate and R.B. Thompson ; "Convolution and Correlation in Real Time with Nonlinear Acoustic," Appl. Phys. Lett., Vol. 16, p 494, (1970).
3. M. Lukkala and G.S. Kino ; "Convolution and Time Inversion using Parametric Interaction of Acoustic Surface Waves," Appl. Phys. Lett., Vol. 18, p 393, (1971)
4. W.C. Wang ; "Convolution of Surface Waves in a Structure of Semiconductor on LiNbO_3 ," Appl. Phys. Lett., Vol. 20, pp. 389~392 (1972)
5. K.C. Whang ; "SAW PN Diode Memory Correlator," Ph.D. Dissertation, Polytechnic Institute of New York. (1979).
6. G.S. Kino ; "Acoustoelectric Interaction in Acoustic Surface Wave Device," Proc. IEEE, Vol. 64, No. 5, pp. 756~759, (1976)
7. S.M. Sze ; "Physics of Semiconductor Device," Willey-Interscience, (1969).
8. P. Das and W.C. Wang ; "Surface Wave Convolver via Space Charge Nonlinearity," Ultrasonic Symp. Proc., pp. 316~321, (1972).

9. G.S. Kino and H. Gautier ; " Convolution and Parametric Interaction with Semiconductor , " J. Appl. Phys. Vol. 44, pp. 5219~5221, (1973)
10. O.W. Otto ; " Theory for Nonlinear Coupling between a Piezoelectric surface and an Adjacent Semiconductor , " J. Appl. Phys. , Vol. 45, pp. 4373 ~4383, (1974)
11. M.E. Nokali and E.L. Adler ; " A Simplified Theory for Semiconductor Coupled Surface Wave Convolver , " IEEE Trans. Vol. 3, pp. 218~221. (1977).
12. H. Matthews ; " Surface Wave Filters , " Willey , (1979) .
13. T.W. Grudkowski ; " Active Acoustic Waves and Electrons in Gallium Arsenide , " Micro -Wave Lab. (1975).
14. W.C. Wang, H. Schachter and F. Cassasa ; " Acoustoelectric Surface Acoustic Wave Demodulator , " Ultrasonic Symp. Proc. , pp. 732~737 (1979). (1979).
15. J. H. Cafrella and W.M. Brown, Jr. et al ; " Acoustoelectric Convolver for Programmable Matched Filtering in Spread Spectrum System , " Proc. IEEE , Vol. 64, No. 5, pp. 756~ 759 (1976).
16. S.A. Reible ; " Acoustoelectric Convolver Technology for Spread Spectrum Communication , " IEEE Trans. Vol. MTT- 29, No. 5 pp. 463~ 473, (1981).
17. J. H. Goll and D.C. Malocha ; " An Application of SAW Convolver to High Bandwidth Spread Spectrum Communication , " IEEE Trans. Vol. MTT- 29, No. 5, pp. 474-482, (1981).
18. R.C. Dixon ; " Spread Spectrum System , " Wiley , (1976).