

氏 名	かとう しゅんじ 加藤 俊治
授 与 学 位	博士 (工学)
学位授与年月日	平成9年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科、専攻の名称	東北大学大学院工学研究科 (博士課程) 電子工学専攻
学位論文題目	弾性表面波コンボルバを用いたスペクトル拡散通信に関する研究
指 導 教 官	東北大学教授 山之内和彦
論 文 審 査 委 員	主査 東北大学教授 山之内和彦 東北大学教授 中村 僖良 東北大学教授 坪内 和夫 東北大学助教授 竹内 正男

## 論 文 内 容 要 旨

### 第1章 緒 論

近年のめざましい無線技術の進歩は、アナログ通信方式からデジタル通信方式へと急速に移行している。この様な中でデジタル通信方式においては、高速広帯域化の方向で音声、文字、データ、画像等を含むマルチメディア無線が発展しつつあり、有線に拘束されない移動体通信分野ではモバイルコンピューティングが普及しつつある。デジタル通信方式の応用例として、PHS (Personal Handyphone System : PHS)、LAN (Local Area Network : LAN)、GPS (Global Positioning System : GPS)、テレターミナル等がある。特にデジタル通信方式の中で秘話、秘匿性に優れ、かつマルチパスフェージングに強いことから最近話題のスペクトル拡散通信方式 (Spread Spectrum : SS) が一躍注目されるようになってきている。

これらのコンシューマ、パーソナル各通信分野においてSS通信システム設計の小型化、省電力化は実用上重要な課題であり、電池による動作の場合、低消費電力は必須条件になっている。この様な背景から従来のSS通信システムでは、特にIC相関器を用いた符号同期相関回路は同期確立を高速にするため、拡散符号 (Pseudo Noise : PN) 長を短くして、同期確立の高速化に対応している。しかしながら上述の対策では弊害も生じ、SS通信方式の特徴である秘話、秘匿性が欠如しCDMA (Code Division Multiple Access : CDMA) 方式による多元接続は困難であり、FDMA (Frequency Division Multiple Access : FDMA) 方

式を用いざるを得ないのが現状である。

以上の背景のもとで前述の課題を解決する機能デバイスとして弾性表面波（Surface Acoustic Wave : SAW）デバイスが注目されている。特にSAWコンボルバは、PN符号長の長短に対応して高速による同期捕捉ができかつ、信頼性が高く、また参照信号のPN符号が自由に変更できることからCDMA方式に対応できる唯一のプログラマブルな機能デバイスとして知られている。SAWコンボルバは構造上分離媒質型、半導体型、エラスティック型等が挙げられるが、いずれも性能作製上一長一短があり、エラスティック型は構造上、単純でコストパフォーマンスのメリットがあるにもかかわらず効率があまり良好でないため、民生用として開発実用化された例は無く、当デバイスを用いた民生機器のSS通信システムの開発も報告されて無かった。

本研究は上述の背景のもとに高効率エラスティック型SAWコンボルバを実用に向けて開発を行い、同時に当デバイスを用いたSS通信ユニット及びSS通信機器を開発試作し、その性能評価を行い、依ってコンシューマ、パーソナル各通信分野への応用を可能にすることを目的としている。

## 第2章 エラスティック型SAWコンボルバの開発

本章ではSS通信方式の受信部に用いられるSAW関連器の中で、特にエラスティック型SAWコンボルバの広帯域化に対してCHIRP型すだれ状電極（Interdigital Transducer : IDT）を検討し、等価回路モデル解析を行った結果、電極間の内部反射を利用した低損失変換器によるフィルタ特性が得られたことを明らかにした。

更に、CHIRP型IDTパターンを実際にY-Z LiNbO<sub>3</sub>基板を用いて作製し、フィルタ特性について計算した数値と実験値がほぼ一致し、その結果として、図1に示す様に音響インピーダンス  $Z_m/Z_g=0.98$  の時、DOWN-CHIRP側に約4 dBの方向性が得られ、また  $Z_m/Z_g=1.02$  の時は方向性が反転することを検証した。

次にメタライゼーションレシオ  $\eta$  を変化させて等価回路モデル解析した結果、図2に示す様に  $\eta$  が大きくなり電極反射が小さくなると、方向性も小さくなることを明らかにした。

一方、エラスティック型SAWコンボルバデバイスの高効率化設計に際し、挿入損失、伝搬損失、相互作用長、入出カインピーダンスマッチング等について解析し、更に種々の実験を行いこの結果を踏まえて、高効率化に対する指針を明確にした。その結果、入力部のIDT設計を一方向性によるCHIRP型IDTに、他方のIDTは両方向性によるCHIRP型ダブル電極とし、また出力部

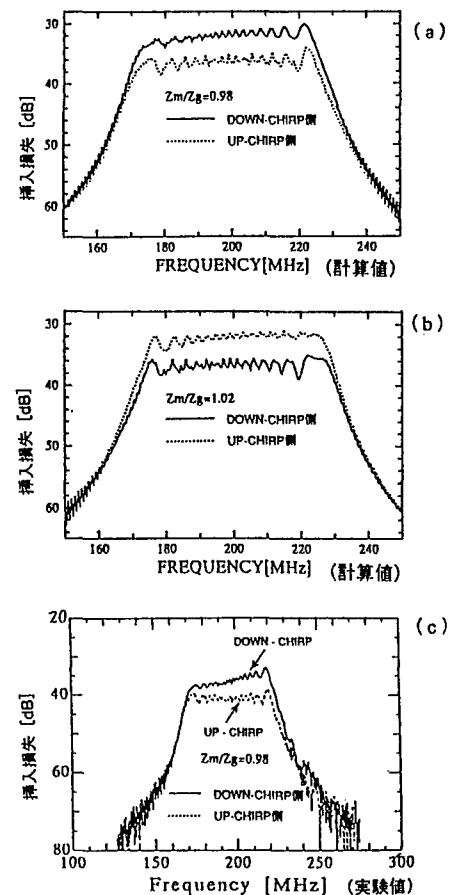


図1  $Z_m/Z_g$ を変化させたときの方向性によるフィルタ特性

の相互作用長はSAWエネルギー伝搬損失の低減及びAl抵抗による位相ずれを保護するために4分割にした結果、中心周波数200 MHz、-3 dB帯域幅40 MHz、相関時間9.77  $\mu$  secにおいてTB (Time Bandwidth: TB) 積3.91で効率-5.4 dBmの高効率の値が得られ、D. P. Morganによって報告されている効率に対して約8 dB改善されたことを示した。更に相互作用長を2分割にし、相関時間4.85  $\mu$  secにおいてはTB積1.94で効率-5.7 dBmの値が得られたことを示した。一方、膜厚50 ÅのCr膜をY-Z LiNbO<sub>3</sub>基板の上にAl膜の下地として形成することにより挿入損失、F値の改善に寄与することを確認した。また、信頼性テストの一環である温度特性について測定した結果、-40°C ~ +85°Cの範囲内で出力レベルの変化率が2 dB以内に治まっていることを明らかにした。尚、搬送波周波数200 MHz、PN符号m系列127チップ長、チップレート13 McpsによるSS信号を発生させて実際に自己相関特性について検証した結果、鋭いバースト波形の自己相関特性が得られ実用レベルに達したことを確認した。これらの総合結果から本設計の妥当性を確認し、世界で初めて民生機器に使用できる低電力入力レベルの広帯域高効率型エラストックSAWコンボルバの開発に成功した。

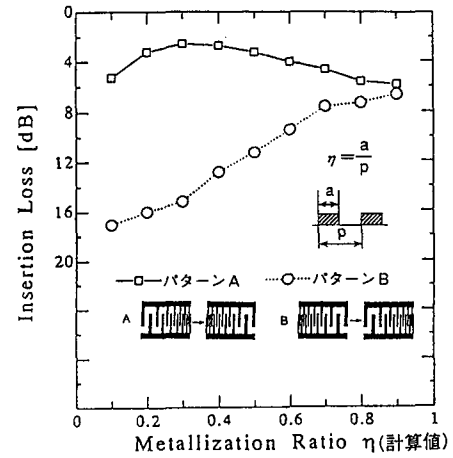


図2 CHIRP型IDTの方向性の $\eta$ 依存性

### 第3章 2.4 GHz帯SSトランシーバユニットの開発

本章では前章で開発試作した高効率エラストック型SAWコンボルバ（相互作用長：9.77  $\mu$  sec）を用いてSSトランシーバユニットの小型省電力化に対する最適設計について考察し、加えて最適変復調方式についても検討した結果、非同期半二重通信、DS (Direct Sequence: DS) - CSK (Code Shift Keying: CSK)、FSK (Frequency Shift Keying: FSK) 方式、サイズ (9 cm  $\times$  5 cm  $\times$  1.1 cm)、重量

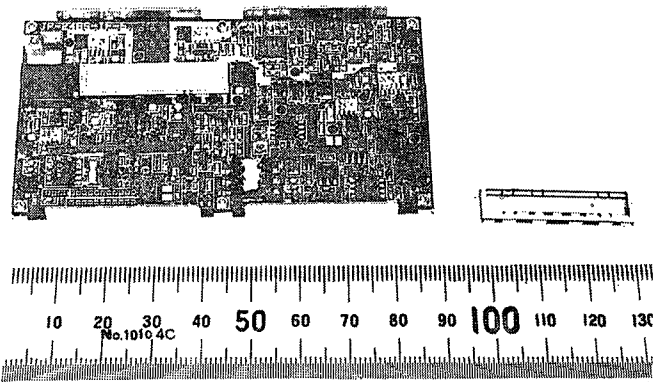


図3 SSトランシーバユニットのSAWコンボルバと実装基板

(75 g)、消費電力 (5 V DC, 送信部: 270 mA 受信部: 286 mA) の仕様で実現できたことを実証した。図3にSSトランシーバユニットの実装基板とエラストック型SAWコンボルバを示す。またマルチパスフェージングに対して反射波の遅延時間: 2  $\mu$  secまで外部回路のデジタル信号処理で対策できることを示し、一方受信感度については計算値と測定値がほぼ一致していることを検証した。更に耐CW (Carrier Wave: CW)、SS干渉特性について実験し、特にCW干渉特性については理論値と実験値に対して解析評価を行った。また当ユニットの電気的特性について測定を行った結果、表1に示す設計仕様に対して満足した結果が得られた。最後に屋内外伝送実験を行い、特に屋内実験における伝送距離については理論解析した結果と合致していることを検証した。その時の実験結果は誤り検出、訂正回路を用いずに屋内

80 m 迄BER (Bit Error Rate: BER) =  $10^{-6}$ 以下、屋外見通し距離において150 m 迄、BER =  $10^{-6}$ 以下の値が得られることを示した。この時の測定条件は、送信出力 +18 dBm、データ伝送速度102 Kbps、 $\lambda/4$ 波長スリーブアンテナの条件下で実験した。

#### 第4章 SS応用システムの開発

前章において開発試作した2.4 GHz帯のSSトランシーバユニットの基盤技術を基に実際にSSワイヤレスオーディオシステムとSSモデムを設計試作した。SSワイヤレスオーディオシステムでは送信部におけるオーディオ信号(50 Hz ~ 15 KHz)をA/D変換し、方式としてはADPCM (Adaptive Differential Pulse Code Modulation: ADPCM) を

用い、変調部は位相ジッタを低減できる方式としてDDS (Direct Digital Synthesizer: DDS) を採用し、DS-FSK方式とし、一方受信部はSAWコンボルバによる符号同期相関方式でコンポリューションの有無をD/A変換し、オーディオ信号を復調できる設計とした。

また、試作した当システムの送受信機における電気的特性について測定を行ったところ、送受信機共に各仕様項目に対して満足する値が得られた。更にSSオーディオ受信機における $E_b/N_0$ 比について検討した結果、オーディオ信号を再生するためには、少なくともBER =  $10^{-6}$ 以下でなければならない。この場合しきい値としてBER =  $10^{-6}$ オーダーを得るためには $E_b/N_0$ 比は12 dBであることが測定により判明した。

ところで、受信機に採用しているエラスティック型SAWコンボルバの設計仕様は、中心周波数: 200 MHz、-6 dB帯域幅: 70 MHz、相互作用長: 1.9  $\mu$  sec、効率: -67 dBmであり、相互作用長はPN符号のm系列63チップ長に対応している。

最後に屋内伝送実験を行った結果、50 m 迄は有線と同じオーディオ信号(50 Hz ~ 15 KHz)の品質が得られ、ハイクオリティの音を再現できたことを示した。これはエラスティック型SAWコンボルバの特徴であるTB積が大きく貢献しており、今後のマルチメディアにおける音声、音楽等のアナログ信号を無線で伝送できることを実証した。この時の測定条件は送信出力: 5 mW/MHz、拡散帯域幅: 66 MHz、PN符号: m系列63チップ長(33 Mcps)、 $\lambda/4$ スリーブアンテナの条件下で測定した。

一方、SSモデムについては3章で開発した2.4 GHz帯のSSトランシーバユニットを用いた。試作したSSモデムのシステム構成はパケット方式による半二重通信でDS-CSK方式を採用し、データ伝送速度は最大102 Kbpsであり伝送速度が可変できる構成になっている。また誤り検出法はARQ方式 (Automatic Repeat Request: ARQ) を採用しており検出符号はCRC (Cyclic Redundancy Check: CRC) 符号を用いている。電源は単一電源DC: 5 Vで消費電流は最大0.5 Aである。電気的特性については、前章で報告したSSトランシーバユニットと同様である。特徴としては、PN符号長を長くして信頼性を優先し、設計した試作機である。その結果、送信出力: 3 mW/MHz、PN符号: m系列127チ

表1 SSトランシーバユニットの仕様

RF周波数	2.484GHz±10PPM以内
送信出力	3mW/1MHz (可変=20dB可)
拡散帯域幅	26MHz以下
NF	6dB以下
ダイナミックレンジ	70dB以上
処理時間	9.77 $\mu$ s
チップレート	13Mcps
PN符号	127Chips
受信感度(BER= $10^{-2}$ )	-90dBm
中間周波数	200MHz
データ伝送速度	102Kbps
電源電圧	DC: +5V
最大消費電流 (無信号時)	300mA以下
最大消費電力	1.5W以下
飛距離 (BER= $10^{-6}$ )	50m以上 (室内) 100m以上 (室外)
RF入力インピーダンス	50 $\Omega$
サイズ	9cm×5cm×1.1cm
重量	75g

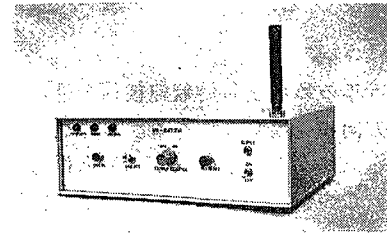
アップ長、データ伝送速度：102 Kbps の条件で伝送実験を行った結果、室内100 m 室外300 m 迄、BER = 10<sup>-6</sup>以下の値が得られたことで実用できるレベルに達したことを実証した。

図4にSSワイヤレスオーディオシステム及びSSモデムの試作機を示す。

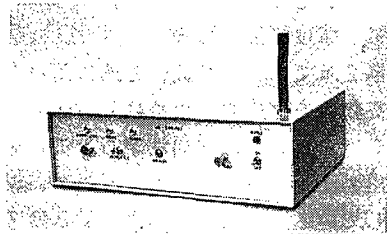
## 第5章 結言

本章では、CHIRP型IDTを用いた広帯域高効率のエラスティック型SAWコンボルバを研究開発し、その結果民生機器に使用できるレベルに達したことを明らかにした。

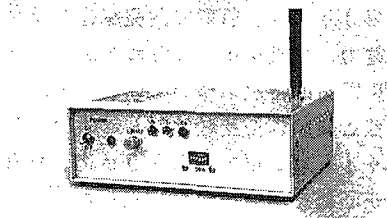
また、当デバイスを用いて名刺サイズによるSSトランシーバユニットを開発し、小型省電力化を実現した。更に開発試作したエラスティック型SAWコンボルバを用いて2.4 GHz帯のSSワイヤレスオーディオシステム及びSSモデムを開発試作し、測定及び実験結果から実用性が初めて確認された。



DS-FSK方式によるオーディオ送信機



DS-FSK方式によるオーディオ受信機



DS-CSK方式によるSSモデム

図4 SSワイヤレスオーディオシステム及びSSモデムの外観

## 審査結果の要旨

近年のめざましい無線技術の進歩は、アナログ通信方式からデジタル通信方式へと急速に移行し、高速広帯域化の方向に発展しつつある。デジタル通信方式の中で秘話、秘匿性に優れかつ、マルチパスフェージングに強いことからスペクトル拡散（SS）通信方式が注目され、コンシューマ、パーソナル各通信分野に広く応用されつつある中で、このシステムの実用化には、機器の高性能化、小型化、省電力化が課題となっている。このような背景の中で本研究は、SS通信の復調器に用いられる弾性表面波（SAW）コンボルバが、高速同期捕捉ができかつ、信頼性が高く、また参照信号のPN符号が自由に可変できることに着目し、民生機器への応用を目的として行った研究を纏めたもので、全編5章からなる。

第1章は緒論である。

第2章では、SS通信方式に用いられるエラスティック型SAWコンボルバの開発について述べている。特に広帯域高効率を達成するために入力部のすだれ状電極（IDT）として、チャープ型電極を採用し、等価回路解析及び実験を行った結果、方向性があることを見いだしている。さらに高効率化に対して挿入損失、伝搬損失、相互作用長、入出力インピーダンスマッチング、ダイナミックレンジ等について解析と実験を行い、高効率化に対する指針を明確にしている。これらの結果、TB積391、効率-54dBmのエラスティック型としては世界最高レベルの高効率の値が得られ、民生機器に使用できる低電力入力レベルの広帯域エラスティック型SAWコンボルバの開発に成功した。これは、実用上有用な成果である。

第3章では、前章で開発試作したエラスティック型SAWコンボルバを用いてSS通信システムの無線部を小型、省電力、軽量タイプにした名刺サイズの2.4GHz帯のSSトランシーバユニットを開発したことを述べている。さらに電気的特性について理論値と設計値を比較検討し、良好な対応を得た。また耐干渉特性についても上述と同様理論値と実験値を比較検討し、よい一致が得られることを示している。最後に屋内外に於いて伝送実験の結果、送信出力+18dBmで室内80m迄、また屋外見通し距離では150m迄いづれもBER=10<sup>-8</sup>以下の値が、誤り検出、訂正回路を用いないで得られたことを述べている。

第4章では、前章で開発したSSトランシーバユニットの技術を基盤に2.4GHz帯に於けるSSワイヤレスオーディオシステム及びSS無線モデムを開発したことを述べている。SSオーディオシステムでは一次変調はFSKを採用しDDS（Direct Digital Synthesizer）技術により位相ジッタの低減を行っている。一方、受信部では当システムに対応したエラスティック型SAWコンボルバを開発し、BW=66MHz、T=1.9μs、効率-67dBmの値が得られ、その結果、送信出力5mW/MHzで室内伝送実験50m迄有線と同等のハイクオリティのオーディオ信号（50Hz～15kHz）が復調されることを実証している。一方、SS無線モデムでは第3章で開発したトランシーバユニットを用いてACK返信によるパケット通信システムを構築している。試作機では、通信制御構成として誤り検出符号はCRC符号を用いたARQ方式を採用し、従来と異なりPN符号長を長くして信頼性を優先させ、その結果、送信出力3mW/MHzで屋内伝送実験100m迄、また屋外見通し距離では300m迄いづれもBER=10<sup>-8</sup>以下の値が得られたことを述べている。

第5章は結言である。

以上要するに本論文は、スペクトル拡散通信の復調器として、新たに開発した高性能エラスティックコンボルバを用いることにより、SS通信モデムの実用化を可能にしたものであり、電子・通信工学の発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士（工学）の学位論文として合格と認める。