

「パルス圧縮レーダの開発実績」

株式会社 光電製作所
www.koden-electronics.co.jp

三輪 勝二

動機

- マグネトロンの寿命
通常1万時間で、長寿命タイプで5年
汎用タイプでは1年で交換し、交換作業10万円程度
ユーザーは大きな負担
- マグネトロンから放射するスプリアス低減
電波天文観測で支障
隣接チャンネルの有効利用(電波は有限資源)
ITU-R勧告SM.1541では厳しい減衰量レベルを達成
することを要求

20070831

電波航法研究会

2

検討結果

- 方式検討
パルス、FM-CW、スペクトル拡散、パルス圧縮等
を検討し、パルス圧縮方式が有効と判断
- パルス圧縮方式でパルス1kW相等の性能
半導体送信部の出力は10W以下
パルス幅を従来のパルス方式より長くする
受信信号のコヒーレント累加
チャープ信号で距離分解能向上

20070831

電波航法研究会

3

スペクトル拡散

- 直接拡散(DS : Direct Spread)の利用

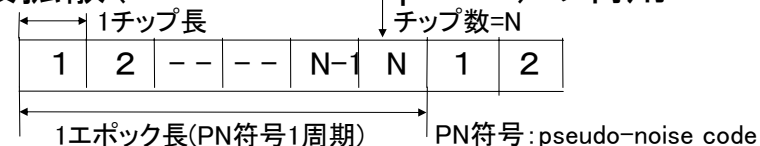


図1 PN符号のイメージ

1シフト量(1チップ長)は距離分解能に相当し、
受信帯域は1チップ13.3nsecに対し
 $2/13.3 \times 10^{-9} = 150.3 \text{ MHz}$
となる。

.... (1)

N=1000では1エポック長が133 $\mu \text{ sec}$ となり、
S/N改善=10log1000=30dB
が得られる。

.... (2)

20070831

電波航法研究会

4

パルス圧縮

- 距離分解能
距離分解能は周波数幅 $1/\Delta f$ に改善され、
 $\Delta f=80\text{MHz}$ のとき
分解能 $=12.5\text{nsec}(3.75\text{m})/2=\text{約}2\text{m}$ (3)
が得られる。
- S/Nの改善
せん頭値の振幅は $\sqrt{T} \times \sqrt{\Delta f}$ で表すことができ、パルス
レーダ $1\mu(1\text{MHz})$ と比較すると
 $T=10\mu$ 10倍、 $\Delta f=80\text{MHz}$ 80倍 から
 $\text{S/N改善}=\sqrt{80} \times \sqrt{10}=20\log 28.3=29\text{dB}$... (4)
が得られる。

20070831

電波航法研究会

5

原理

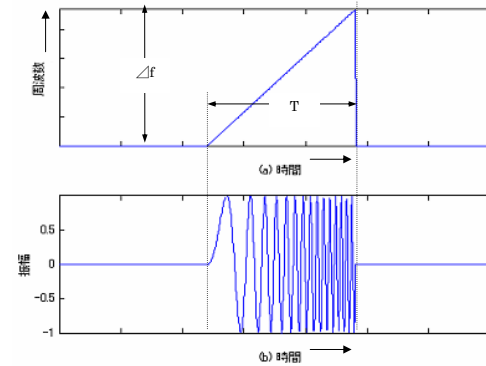


図2チャープ信号パルス圧縮方式説明図(伸長・拡散)

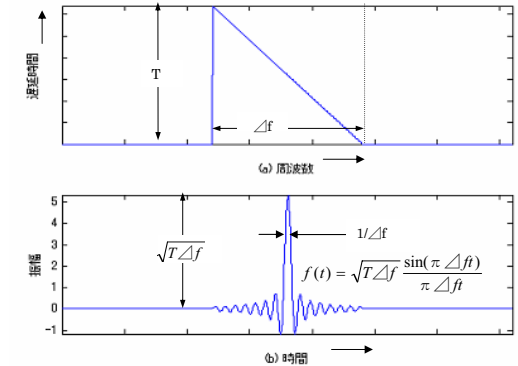


図3チャープ信号パルス圧縮方式説明図(圧縮・逆拡散)

20070831

電波航法研究会

6

処理アルゴリズムと回路

処理アルゴリズム

$$f(t) = \sum_{i=0}^N r(t + i\Delta t) \times s^*(i\Delta t) \dots (5)$$

*は共役複素数を示す

Δt : サンプル間隔

N : $T/\Delta t$

$r(t)$: 受信信号

s : 直線FMパルス

$$s(t) = \begin{cases} \exp(j\pi \frac{\Delta f}{T} t^2) & (0 \leq t \leq T) \\ 0 & (t < 0 \text{ または } t > T) \end{cases} \dots (6)$$

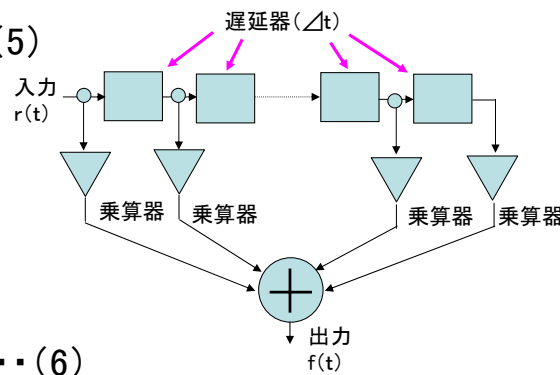


図4 パルス圧縮回路
(トランスバーサルフィルタ)

20070831

電波航法研究会

7

構成

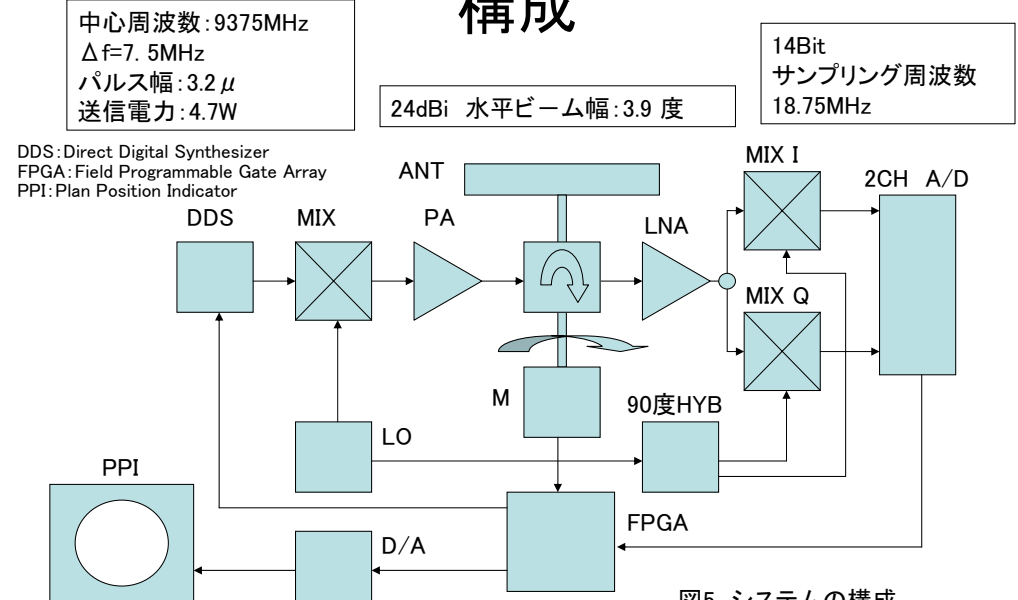


図5 システムの構成

20070831

電波航法研究会

8

トランスバーサルフィルタ出力

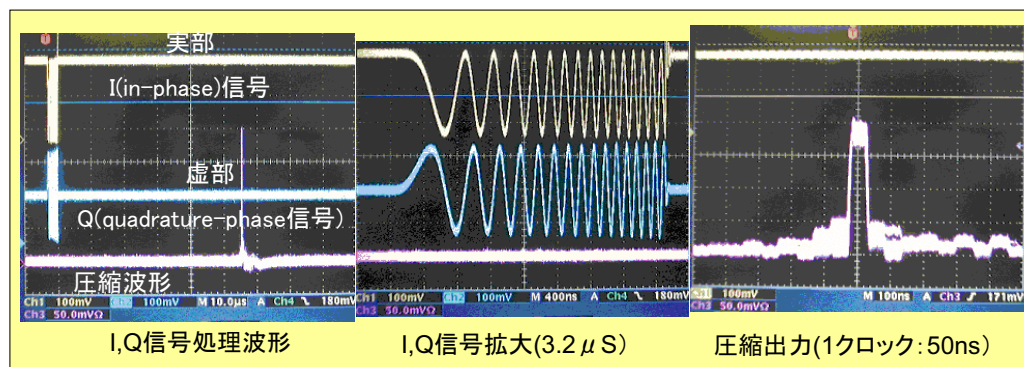


図6 トランスバーサルフィルタ入出力

半導体増幅器(PA)寸法図

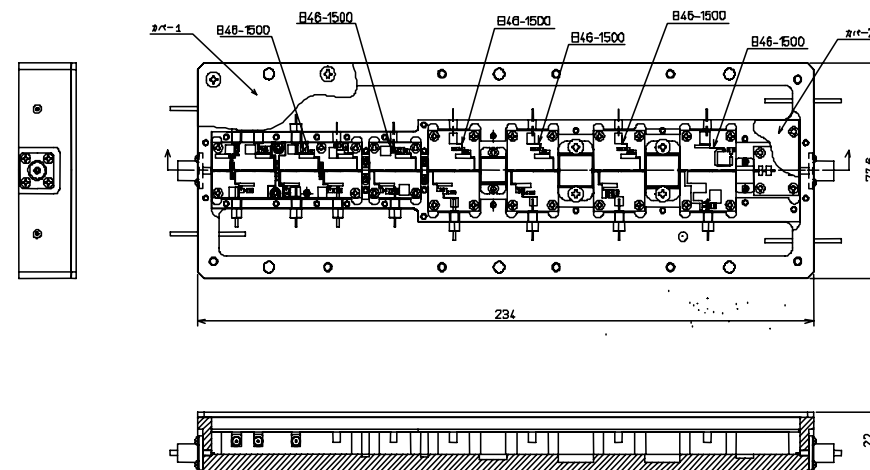


図7 PA寸法図

半導体増幅器(PA)配置図

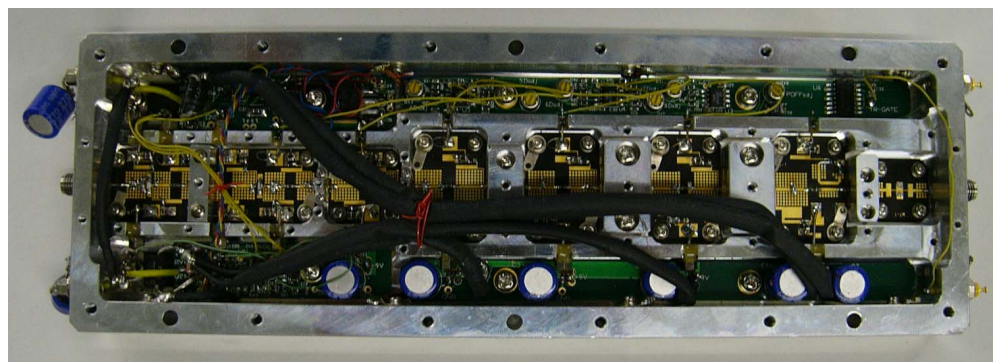


図8 PA配置図

送受信部の利得

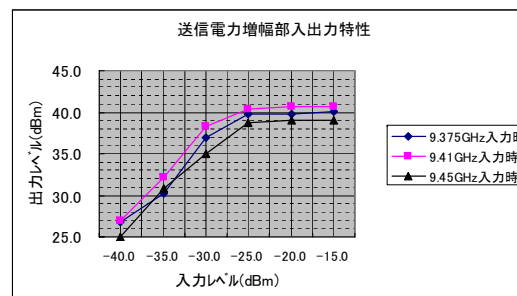


図9 PA部入出力特性

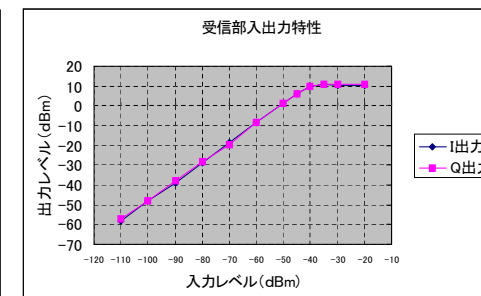


図10 受信部入出力特性

DDSの出力特性

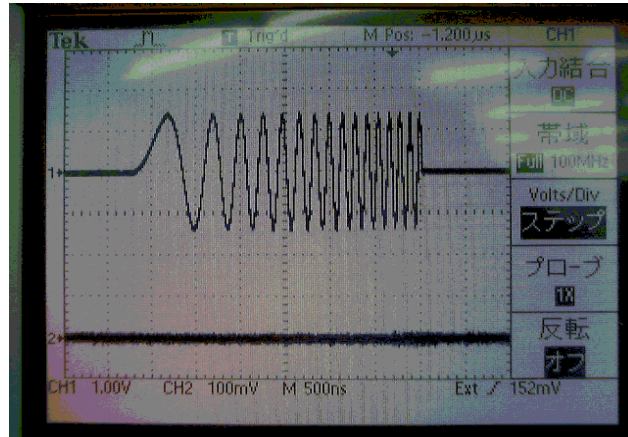


図11 チャープ信号

20070831

電波航法研究会

13

実験局の申請1

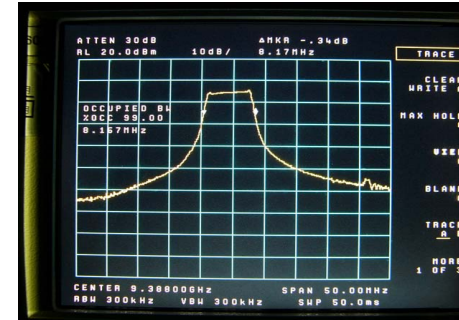


図12 占有帯幅測定

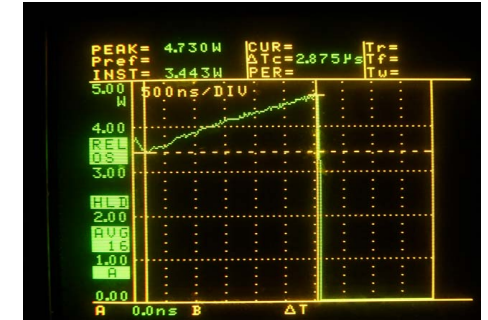


図13 PEAK電力測定

1. 掃引幅: 7.5MHz、パルス幅: 3.2 μ
占有帯域幅: 10.5MHz、PEAK電力: 4.73W
2. 掃引幅: 7.5MHz、パルス幅: 6.4 μ
占有帯域幅: 8.92MHz、PEAK電力: 4.58W
3. 掃引幅: 7.5MHz、パルス幅: 12.8 μ
占有帯域幅: 8.17MHz、PEAK電力: 4.46W

20070831

電波航法研究会

14

実験局の申請2

- コンピュータシミュレーション
掃引幅: 9.375MHz
パルス幅: 12.8 μ
より
占有帯域幅: 9.92MHz
が得られた
掃引幅: 7.5MHzでの
占有帯域幅: 8.17MHz
の測定値に比例

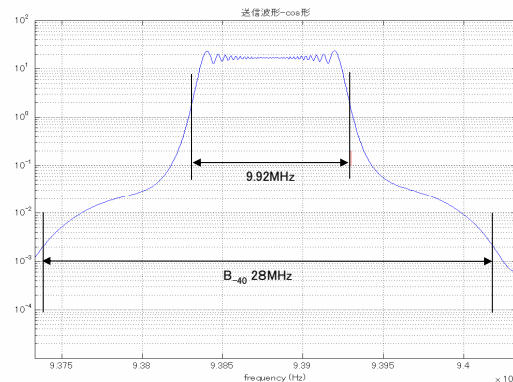


図14 シミュレーション結果

20070831

電波航法研究会

15

スプリアス規制

- ITU-R勧告SM.1541では40dBバンド幅の両端から20(40)dB/decade減衰曲線*が、基本波の最大値から43+10log(PEP) 又は60(80)dBのいずれか小さい減衰量レベルと接する周波数とする。
* 20dB減衰曲線とは、40dBバンド幅の境界(中心から50%)から500%まで対数関数的に20dB減衰する曲線を言う。

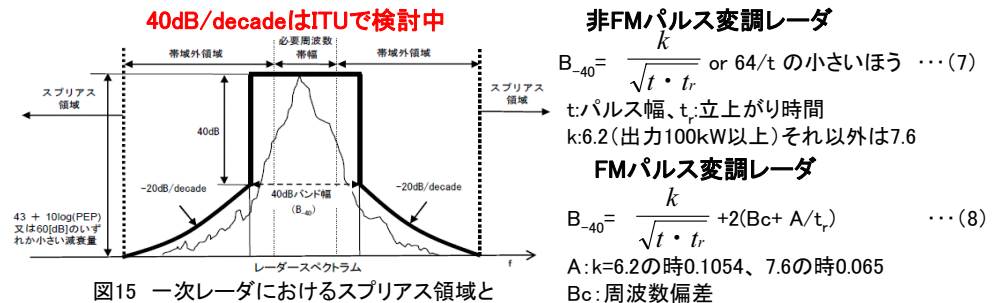


図15 一次レーダにおけるスプリアス領域と帯域外領域の境界

20070831

電波航法研究会

16

フィールドでの測定1

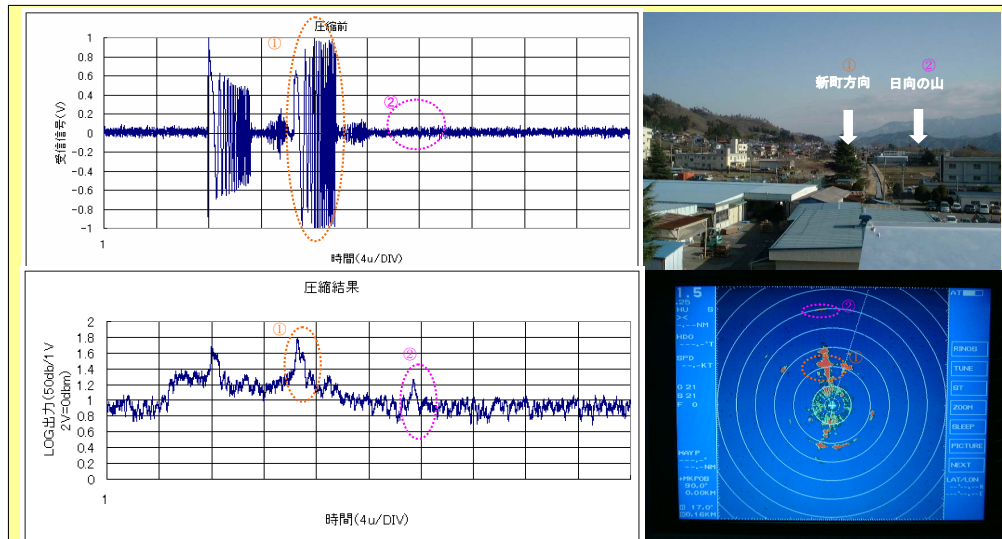


図16 拡散と逆拡散

20070831

電波航法研究会

17

フィールドでの測定2

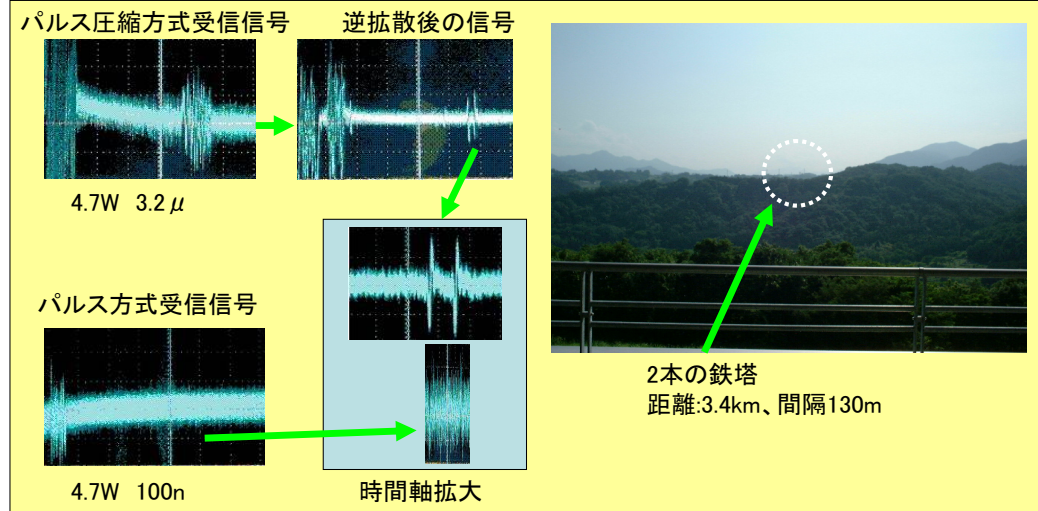


図17 パルス圧縮とパルス方式の受信信号比較

20070831

電波航法研究会

18

フィールドでの測定3

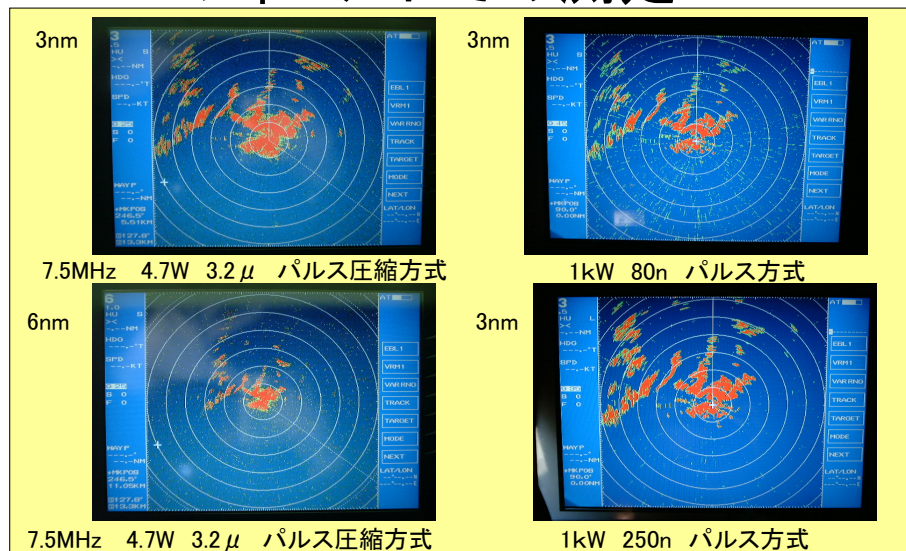


図18 パルス圧縮とパルス方式の最大探知距離

20070831

電波航法研究会

19

フィールドでの測定4



図19 海上実験

電波航法研究会

20070831

20

検討 周波数と差別化

- 周波数の検討
海上無線航行レーダとして認められている周波数割当
2.92～3.1、5.46～5.65、9.32～9.5、32.3～35.2GHzの4つの帯域
無線航行の用途割当(総務省と要調整)
24.25～25.25GHz、31.8～33.4GHzの2つの帯域
- 既存製品と差別化し購買意欲を高める
30GHz帯域の利用は9GHz帯と比べ同一アンテナ形状で利得が約5dBi向上し、3倍の方位分解能が得られる。

20070831

電波航法研究会

21

船舶用レーダの規定

- 設備規則48条及び郵政省告示第329号の技術的条件
周波数：3GHz帯、9GHz帯(9375、9410、9445MHz)、
32.3～35.2GHzの周波数、
5GHz帯(小型船舶への適用なし)
電波形式：**P0N(施行規則4条の2)**
注)P無変調パルス列、0変調信号無し、N無情報
占有周波数帯域幅(99.5%)：100MHz(3GHz)、
110MHz(9GHz)
スプリアス：40dB、60dB(2007年12月より実施)
偏波：水平(500t以上)

20070831

電波航法研究会

22

30GHz帯の詳細

表1 レーダ性能諸表

	探知能力	分解能	精度
30GHz	10度傾斜で7マイル 5000t船舶 距離2マイルで10m ² の浮標、距離25m で10m ² の浮標	方位角40分で等 距離にある2つの 目標を識別、同一 方向で8mを識別 (1.9キロレンジ以下)	距離レンジ値の1%以 内(1.4キロ未満は14m 以内) 1.4キロの物標の方位 を1度以内で測定
他の周波数	10度傾斜で7マイル 5,000t船舶 距離2マイルで10m ² の浮標、距離92m で10m ² の浮標	方位角3度で等距 離にある2つの目 標を識別、同一方 向で68mを識別 (最小距離レンジ)	距離レンジ値の6%以 内(0.75マイル未満は 82m以内) 0.75マイルの物標の方 位を2度以内で測定

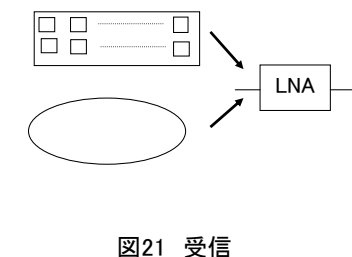
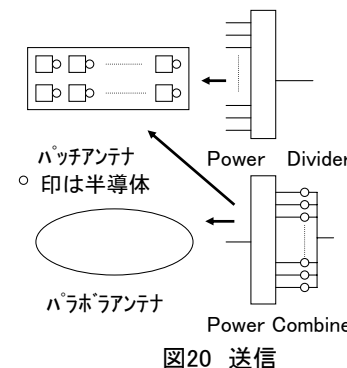
20070831

電波航法研究会

23

検討 アンテナ

- アンテナ
半導体付加方式のアンテナは製作困難(大学で研究中)
現状はサーキュレータによる送受信の切替



20070831

電波航法研究会

24

MSAアンテナの試作

- MSA(マイクロ・ストリップ・アンテナ)の構成と特性

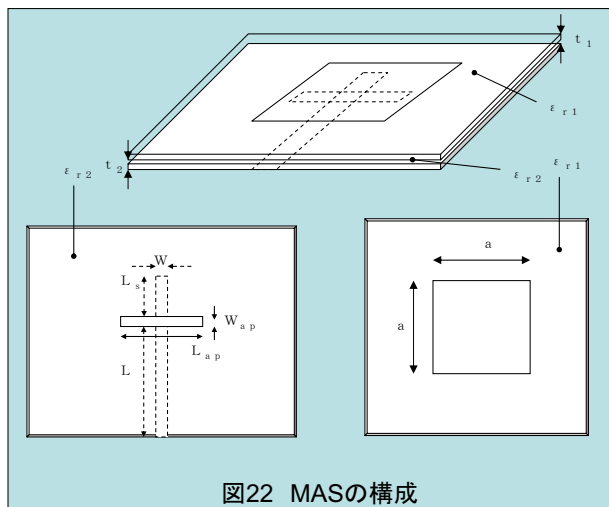


図22 MASの構成

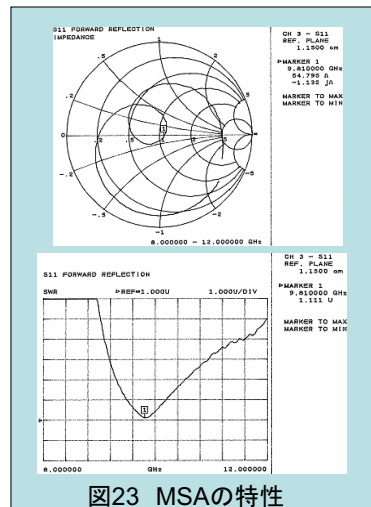


図23 MSAの特性

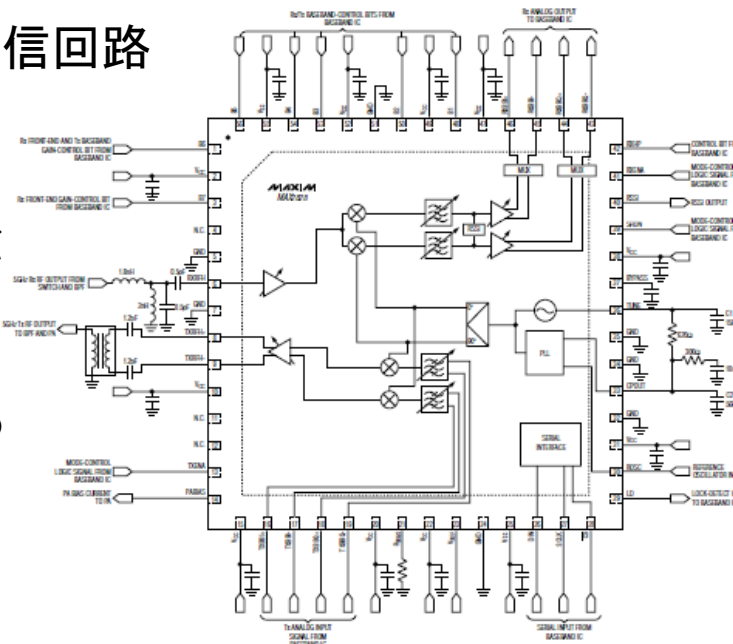
20070831

電波航法研究会

25

検討 送受信回路

- 最近のRFトランシーバ
- ワンチップで送受信回路を構成
- 無線LAN分野の技術を活用すれば...



電波航法研究会

図24 トランシーバ

26

シングル/デュアルバンド802.11a/b/g ワールドバンドトランシーバIC

- ◆ ワールドバンド動作
- MAX2828: 4.9GHz~5.875GHz(802.11a)
- MAX2829: 2.4GHz~2.5GHz及び4.9GHz~5.875GHz(802.11a/b/g)
- ◆ クラス最高のトランシーバ性能
- 54MbpsにおけるRx感度: -75dBm(802.11g)
- Tx側波帯抑制: -46dB(802.11g)/-51dB(802.11a)
- Tx EVM: 1.5%(802.11g)及び2%(802.11a)
- LO位相ノイズ: -100dBc/Hz(802.11g)/-95dBc/Hz(802.11a)
- プログラマブルベースバンドローパスフィルタ
- 3線式シリアルインタフェース付きPLLを内蔵
- レシーバの利得制御範囲: 93dB(802.11g)/97dB(802.11a)
- Rx I/Q DC設定時間: 200ns
- Rx RSSIのダイナミックレンジ: 60dB
- Txパワー制御範囲: 30dB
- Tx/Rx I/Qエラー検出
- Tx及びRxのI/Qアナログベースバンド
- インタフェース
- デジタルモード選択(Tx, Rx, スタンバイ、及びパワーダウン)
- シリアル及びパラレル利得制御の両方をサポート
- ◆ MIMOとスマートアンテナの互換性
- 複数のトランシーバ間でコヒーレントなLO位相
- ◆ 40MHzのチャネル帯域幅をサポート(ターボモード)

20070831

電波航法研究会

27

A16-82100シングルボード 4ch Up/Down コンバータ

- A16-82100は、4系統の送受信回路を実装した6Uシングルスロット/CompactPCI準拠のスレーブボードです。
- 2.4GHz帯および5GHz帯の無線LAN周波数をカバーしています。
- A16-82100は、ベースバンドIQ信号をRF信号に、RF信号をベースバンドIQ信号に変換します。
- 送受信回路は、4系統一括で送信回路/受信回路に切り替わります。
- A16-82100は、内蔵の水晶発振器または外部リファレンス信号を基準に、4系統が同期して動作します。
- このため、MIMO通信やビームフォーミングを用いた送受信機に使用することができます。

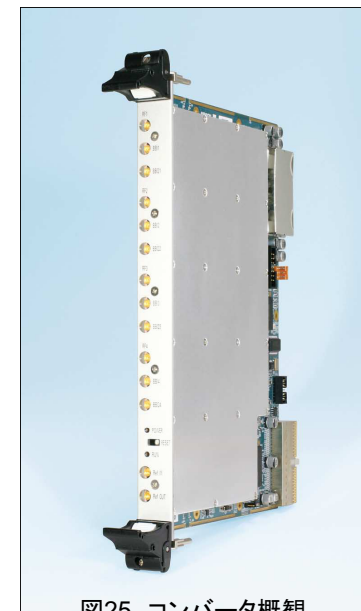


図25 コンバータ概観

20070831

電波航法研究会

28

特徴:ブロック図

- 6Uシングルスロットサイズ
- トランシーバICにMAXIM社製 MAX2829を4個搭載
- 4chの送受信系が同期して 送信/受信動作
- 2.4GHz帯と5GHz帯の バンドパスフィルタを実装
- ボード内に基準用水晶発振器搭載
- CompactPCIインタフェースにPLX 社製 PCI9030を使用
- 制御用プロセッサの搭載による 容易なユーザインタフェース

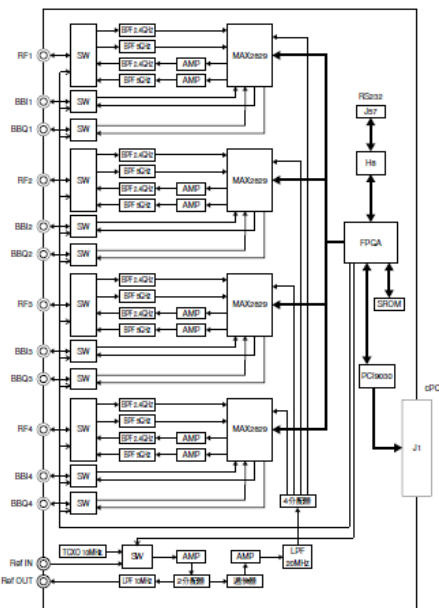


図26 ブロック図

20070831

電波航法研究会

29

項目:仕様

- RFチャンネル数: 4チャンネル (4ポート)
- BB入力チャンネル数: 4チャンネル (8ポート)
- BB出力チャンネル数: 4チャンネル (8ポート)
- REF入出力: 10MHz入力1ポート、10MHz出力1ポート
- RF周波数範囲: 2.412GHz~2.500GHzおよび4.900GHz~5.350GHz、5.470GHz~5.875GHz
- 最大チャンネル帯域幅: 40MHz
- ポートインピーダンス: 50Ω 公称値
- 許容最大入力レベル: +10dBm (RF, BB)
- Rx利得範囲: 0~+80dB
- Rx (Ga設定: 40dB) 雑音指数: 15dB
- 出力P1dB: +12dBm
- 出力IP3: +24dBm, 出力IP2: +41dBm
- Tx (Ga設定: 0dB) 基本利得: +11dB
- 出力P1dB: +14dBm
- 出力IP3: +27dBm, 出力IP2: +69dBm
- チャンネル間相対位相: RFチャンネル間相対位相は任意の値
- チャンネル間相対位相安定度: RFチャンネル間相対位相の30分間における位相変化量は温度一定の条件において±5度以内
- チャンネル間振幅偏差: RFチャンネル間振幅偏差は±2dB以内
- チャンネル間振幅偏差安定度: RFチャンネル間振幅偏差の30分間における振幅変化量は温度一定の条件において±1dB以内
- 使用トランシーバIC: MAX2829 (MAXIM)
- 使用CPCIインタフェースIC: PCI9030 (PLX)
- 制御用マイクロプロセッサ: HD64F2329 (ルネサス)、cPCIコネクタ (J1): 17211102102 (ハーディング)、フロントパネル同軸コネクタ: MMCX-R-EL (東光電子)、シリアル制御コネクタ (J57): IL-G-3P-S3T2-SA (JAE)
- 基板寸法 (mm): 233.358 (高さ) × 160.0 (奥行き) × 20.0 (幅)

20070831

電波航法研究会

30

検討 信号処理 MUSICとFFTの比較1

MUSIC: Multiple Signal Classification
FFT: Fast Fourier Transform

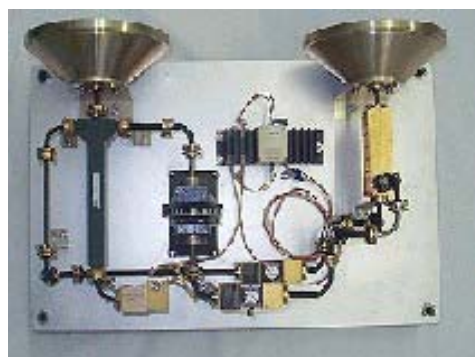


図27 ミリ波FM-CWレーダ試作機外観

20070831

電波航法研究会

31

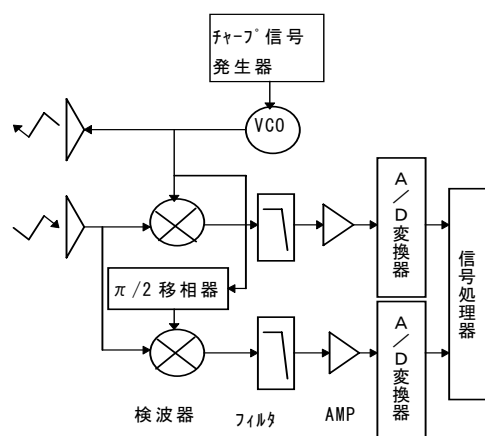


図28 ブロック図

信号処理 MUSICとFFTの比較2

- 時速30kmの車両処理
MUSICは相関行列の大きさを 20×20 、空間平均20回で処理
FFTは1024ポイントで処理
- 結果
三角波の周波数増区間と減区間の処理データを重ねて表示
MUSICは物標を鋭いピークで示し、FFTに比べ分解能、S/N比が良い

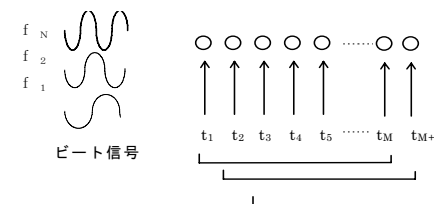


図29 観測モデル

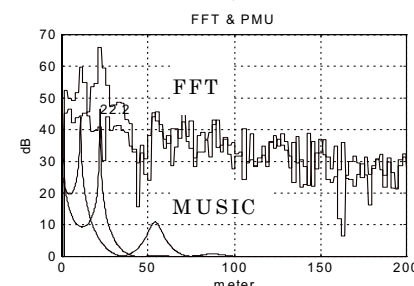


図30 実験結果

20070831

電波航法研究会

32

信号処理 MUSICとFFTの比較3

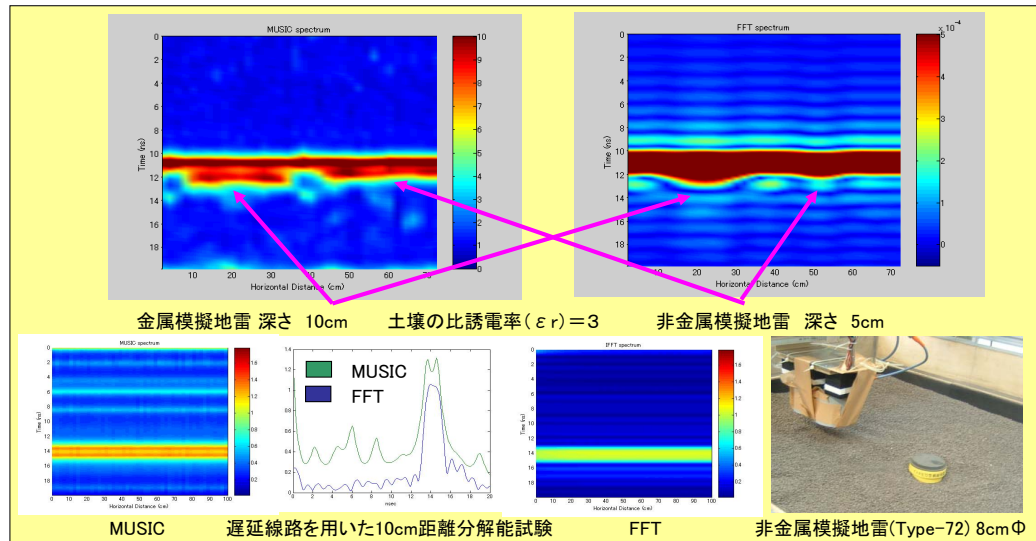


図31 MUSICとFFTの処理結果比較

20070831

電波航法研究会

33

まとめ1

- チャープ信号を利用したパルス圧縮レーダ
1940年代に考案され長い研究の歴史
文献調査では、リアルタイムデジタル信号処理パルス圧縮レーダのPPI映像は無い
本実験で取得した映像は大変貴重
- パルス圧縮方式のマグネトロンレスレーダ
マリンレーダとして近距離(3マイル程度)利用可
半導体化でマグネトロンの交換作業無し
マグネトロンレス: 半導体(固体化)

20070831

電波航法研究会

34

まとめ2

- 送信部終段の半導体が高価
コストがクリアできれば実用化の可能性大
X Band 15W 1000個以上@約5万円
- 環境にやさしい電波
マグネトロンに比べ、スプリアス規制に制限されることなく、安定な回路が構築
- デジタル回路の活用
送信電力、分解能、感度が容易に設定可能

20070831

電波航法研究会

35

参考文献

- (1) 富沢 良行、荒井 郁男“遅延相関器を用いたチャープ信号パルス圧縮地中レーダ” 信学会(B) Vol.J83-B No.1 pp.113-120 2000年1月
- (2) 荒井 郁男“パルス圧縮装置ならびにその利用装置” 特開平5-1578
- (3) 日本無線“車載レーダ装置” 特許第3056579
- (4) 神力 正宣“レーダ技術の変遷” J.IEE Japan, Vol.120, No.10 pp.606-609
- (5) 情報通信審議会 情報通信技術分科会 スプリアス委員会“審議報告”
- (6) 荒井郁男 電気通信大学“MUSIC処理レーダ実験データ”
- (7) 上瀧 實 編集“ミリ波技術の手引と展開” REALIZE INC.
- (8) 「ミリ波技術の基礎と応用」編集委員会」監修・編集 “ミリ波技術の基礎と応用” REALIZE INC.
- (9) 吉田 孝 監修“改訂 レーダ技術” 電子情報通信学会
- (10) 三輪 勝二 他“ミリ波FM-CWレーダへのMUSICの応用” IEEE VOL.1997, NO.Sogo Pt 2 PAGE.228
- (11) カタログ“MAX2828” MAXIM
- (12) 石曾根孝之 東洋大学“電磁結合型MSAの入カインピーダンス特性” 2001年3月
- (13) 三輪勝二“パルス圧縮レーダの開発” 日本航海学会 航法システム研究会 2006年5月

20070831

電波航法研究会

36