

「パルス圧縮レーダの開発」

株式会社光電製作所

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ではきびしい減衰量レベルを達成することを要求

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

雑音電力

- 雑音電力(P_n)

$$P_n(W) = 10\log(KT) + 10\log(B) + NF \dots (1)$$

(dBmへの変換は $10\log 1000$ を加える)

K (ボルツマン定数): 1.38×10^{-23}

T (絶対温度): 300k (摂氏 27°)

B (帯域幅): $0.1、1、3、15\text{MHz}$

NF (システムの雑音指数): 10dB

上記の式に数値を代入し

$P_n(B=0.1、1、3、15、80、150\text{MHz}) = -114、-104、-99、-92、-85、-82\text{dBm}$ が得られる。

受信電力

- 受信電力 (P_r)

$$P_r = \frac{P_t \cdot G(\theta)^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma(\phi)}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \dots (2)$$

P_t (送信電力): 10W (10000)

$G(\theta)$ (アンテナ利得): 39.5dBi (8913)

λ (波長): 0.01m

$\sigma(\phi)$ 有効反射断面積: 2m² (2m²は計算上の標準値)

R (距離): 8000m

上記の式に数値を代入し $P_r = -107\text{dBm}$ が得られる。

FM-CW1

- 検出距離対距離周波数(fb)

$$fb = \frac{4\Delta f}{C \cdot T_m} r \quad \dots (3)$$

Δf (FM変調幅): 10、80MHz

C (光速): 3×10^8 m

T_m (変調繰り返し周期): 0.01sec (100Hz)

r (目標物までの距離): 1000、8000m

上記の式に数値を代入し

$\Delta = 80$ MHzではfb($r=1000$ 、8000) = 107、853kHz
が得られる。

$\Delta f=10$ MHzではfb($r=8000$) = 107kHzが得られる。

FM-CW2

- 相対速度対速度周波数(f_v)

$$f_v = \pm \frac{2f_o}{C} V \quad \dots (4)$$

f_o (中心周波数): $10 \times 10^9 \text{Hz}$

V (速度): 33.3m/s (120Km/h)

C (光速): $3 \times 10^8 \text{m}$

上記の式に数値を代入し

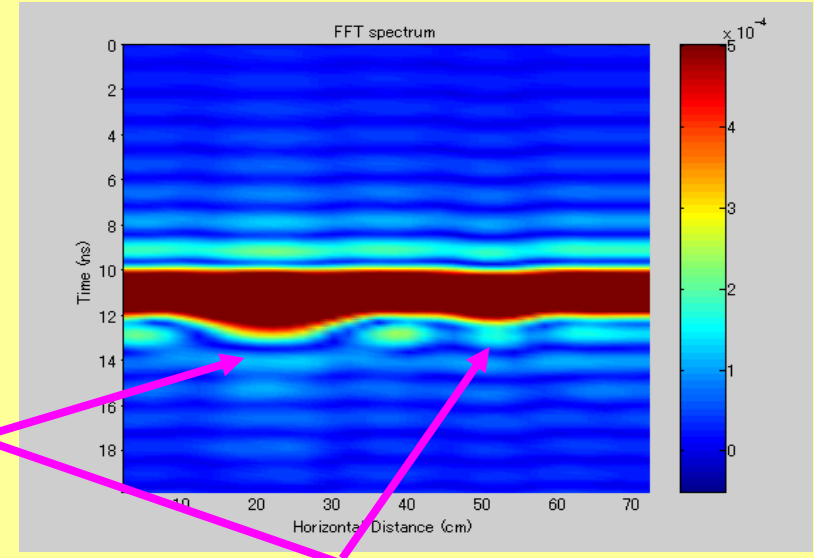
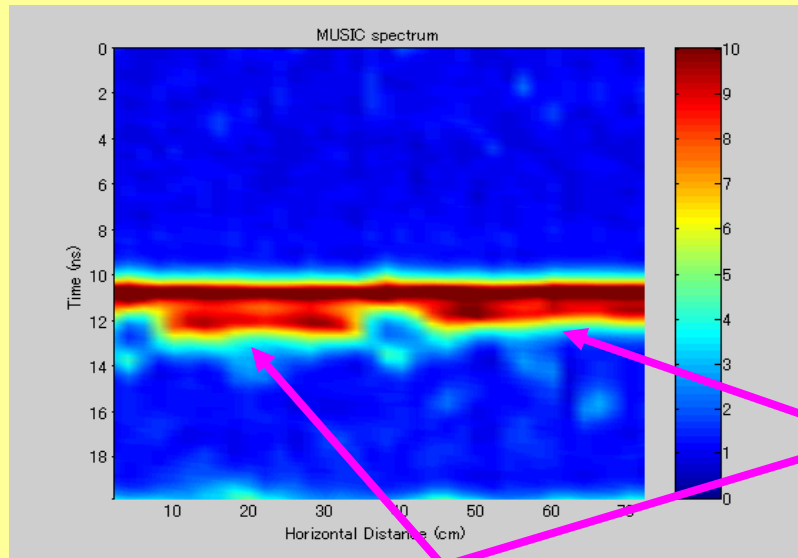
f_v ($V=20$ 、 120km/h) $= 0.37$ 、 2.22kHz が得られる。

最高周波数は 8km で $853 \pm 2.2 \text{kHz}$ となる。

MUSIC処理レーダ

MUSIC: Multiple Signal Classification

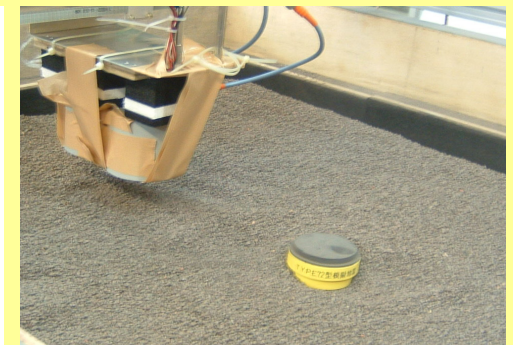
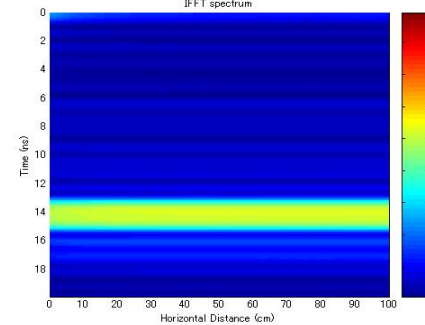
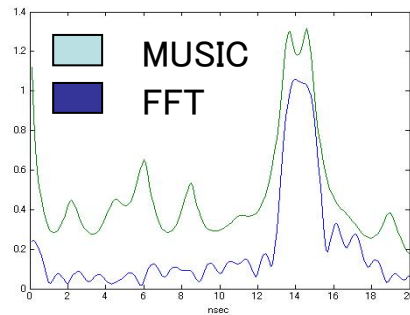
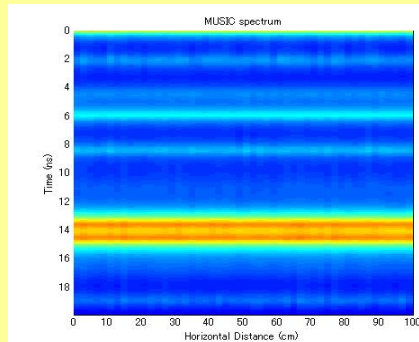
FFT: Fast Fourier Transform



金属模擬地雷 深さ 10cm

土壌の比誘電率(ϵ_r)=3

非金属模擬地雷 深さ 5cm



MUSIC

遅延線路を用いた10cm距離分解能試験

FFT

非金属模擬地雷(Type-72) 8cmΦ

図1 MUSICとFFTの処理結果比較

スペクトル拡散

- 直接拡散 (DS : Direct Spread) の利用

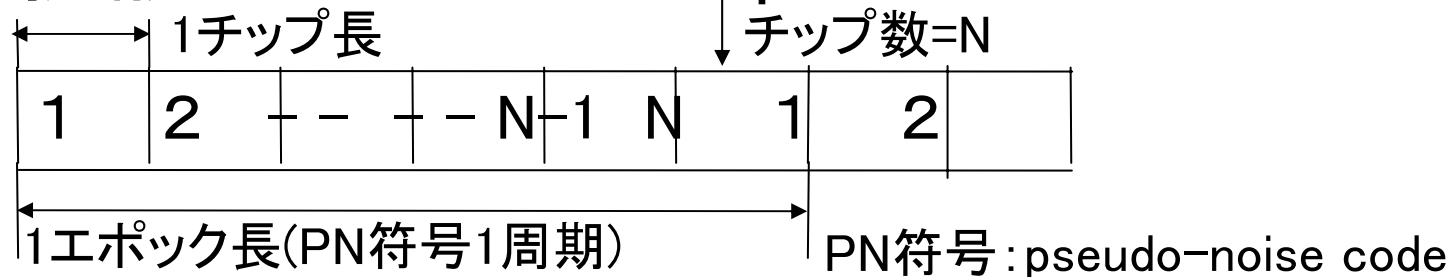


図2 PN符号のイメージ

1シフト量は(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
 $2/13.3 \times 10^{-9} = 150.3 \text{ MHz}$ (5)

となる。
 N=1000では1エポック長が133 $\mu \text{ sec}$ となり、
 $S/N \text{ 改善} = 10 \log 1000 = 30 \text{ dB}$ (6)
 が得られる。

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 $=12.5\text{nsec}(3.75\text{m})/2=\text{約}2\text{m} \quad \dots\dots (7)$
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

$S/N\text{改善}=\sqrt{80} \times \sqrt{10}=20\log 28.3 =29\text{dB} \dots\dots (8)$
が得られる。

方式検討

注)各方式は実現性のある回路構成で検討したので同一帯域でも分解能、改善係数が異なる。

表1 レーダ方式検討

項目/方式	パルス	FM-CW	スペクトル拡散	パルス圧縮	備考
雑音電力(P _n) : dBm	-92、15MHz -99、3MHz	-104、1MHz -114、0.1MHz	-82、150MHz	-85、80MHz	MHzは 受信帯域幅
受信電力(P _r): dBm R=8Km、Pt=10W	-107	-107	-107	-107	アンテナ利得 39.5dBi
S/N改善係数(S _a) : dB	0	0	30 N=1000	29 Δf=80、 T=10	
S/N (P _r +S _a)-P _n : dB	-15、15m -8、150m	-3、 2m 7、 15m	5、 2m	7、 2m	mは 距離分解能
技術的課題	受信感度	送信信号抑圧 ドップラ周波数 解析	送信信号抑圧 相関器	送信信号抑圧 相関器	
その他	パルス幅 1μ、100n	スイープ周波数 80、10MHz 周期 100Hz	1チップ長 13.3n	チャープ幅 80MHz、10μ	

原理

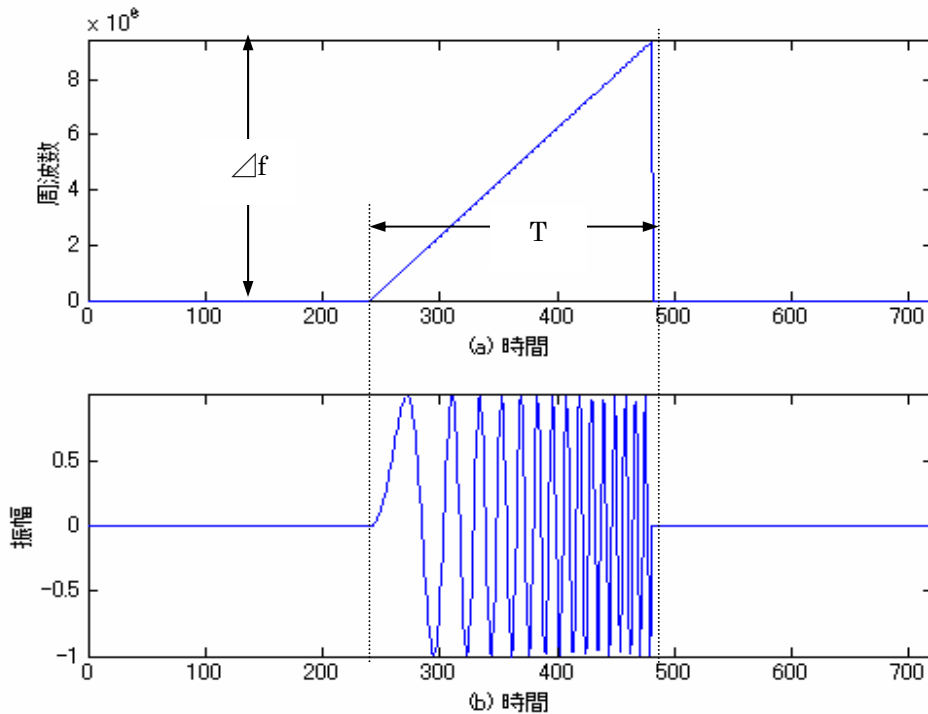


図3チャープ信号パルス圧縮方式説明図(伸長・拡散)

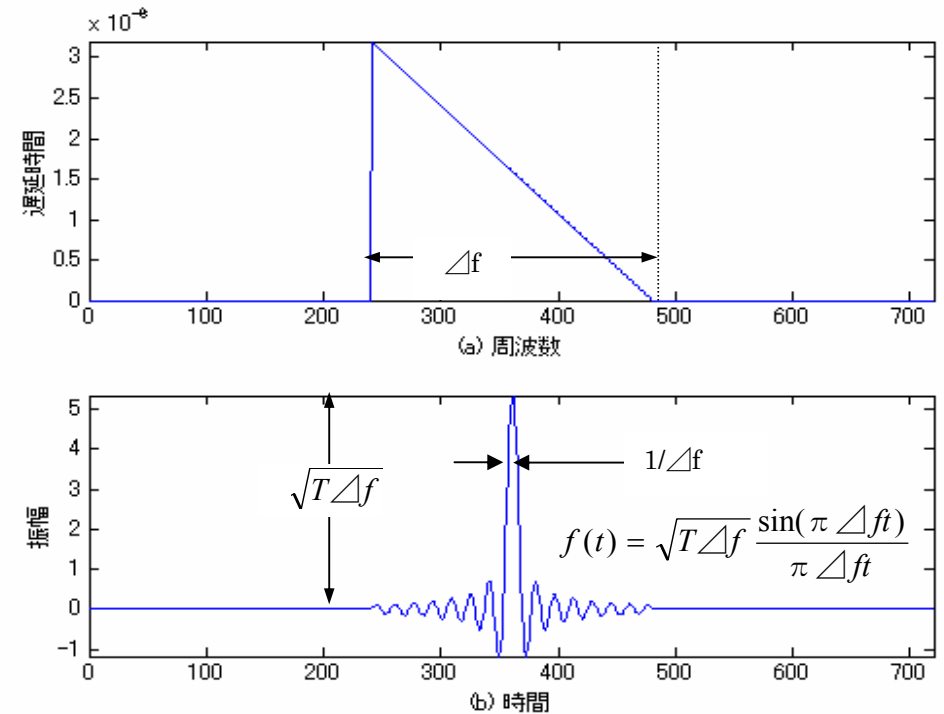


図4チャープ信号パルス圧縮方式説明図(圧縮・逆拡散)

構成

中心周波数: 9388MHz
 $\Delta f = 7.75\text{MHz}$
パルス幅: 3.2μ 、
送信電力: 4W

24dBi 水平ビーム幅: 3.9 度

14Bit
サンプリング周波数
18.75MHz

DDS: Direct Digital Synthesizer
FPGA: Field Programmable Gate Array
PPI: Plan Position Indicator

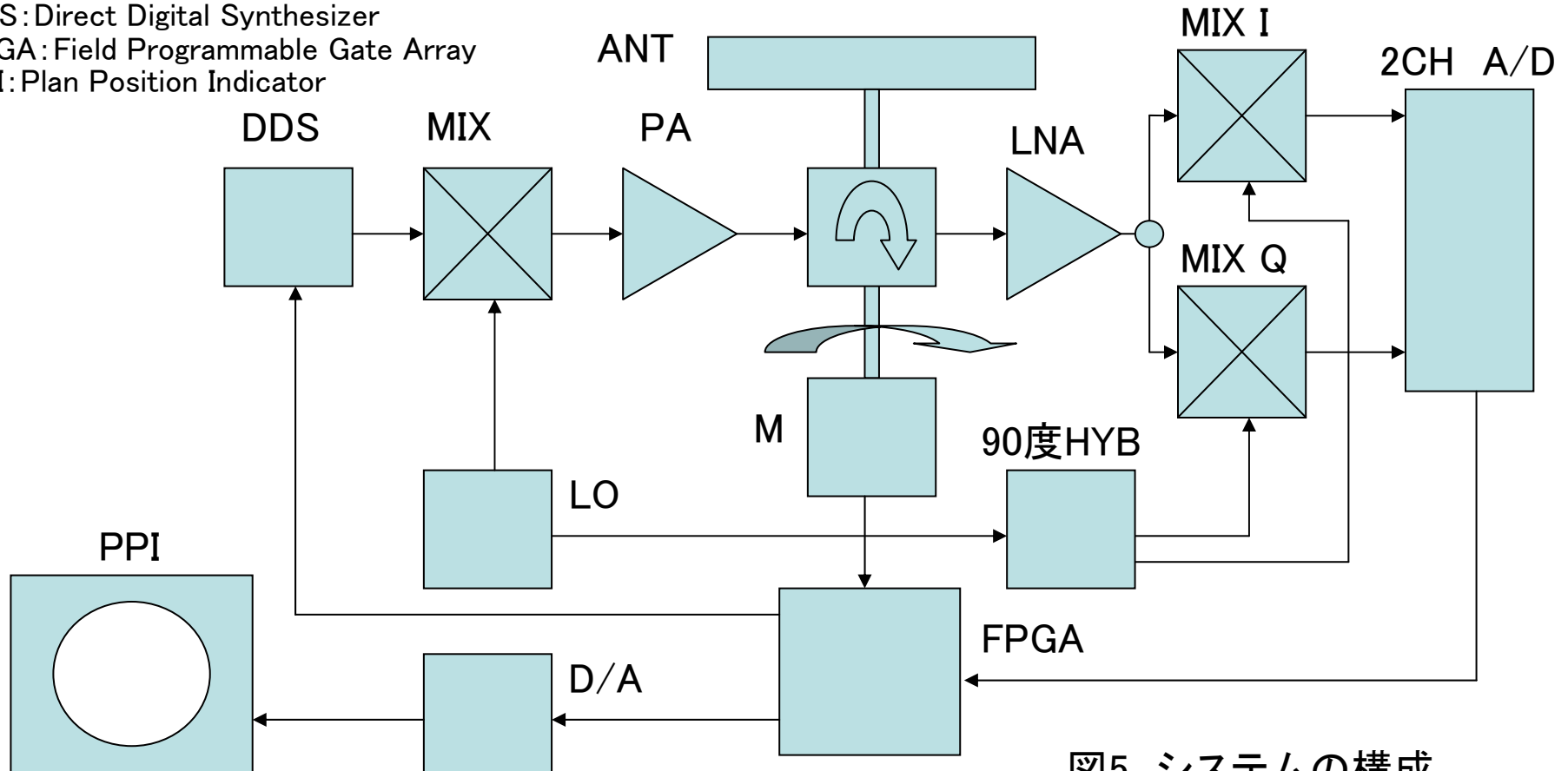


図5 システムの構成

半導体増幅器(PA)

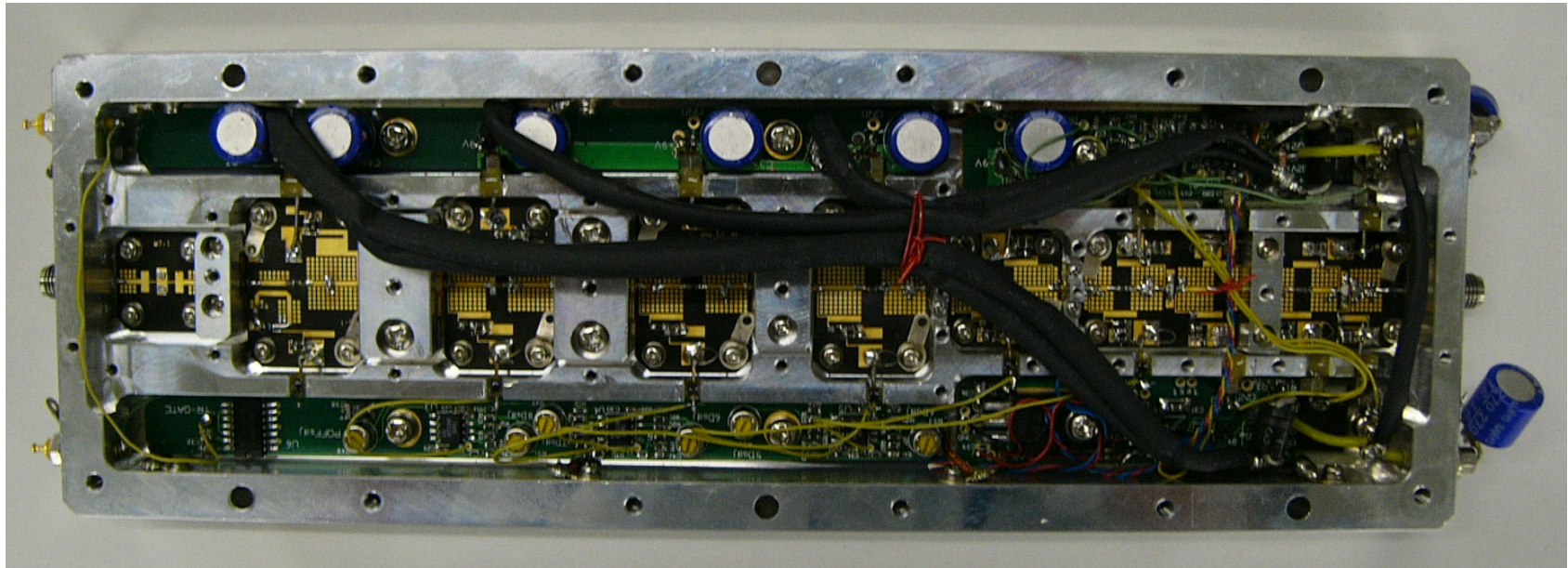


図6 PA配置図

送受信部の利得

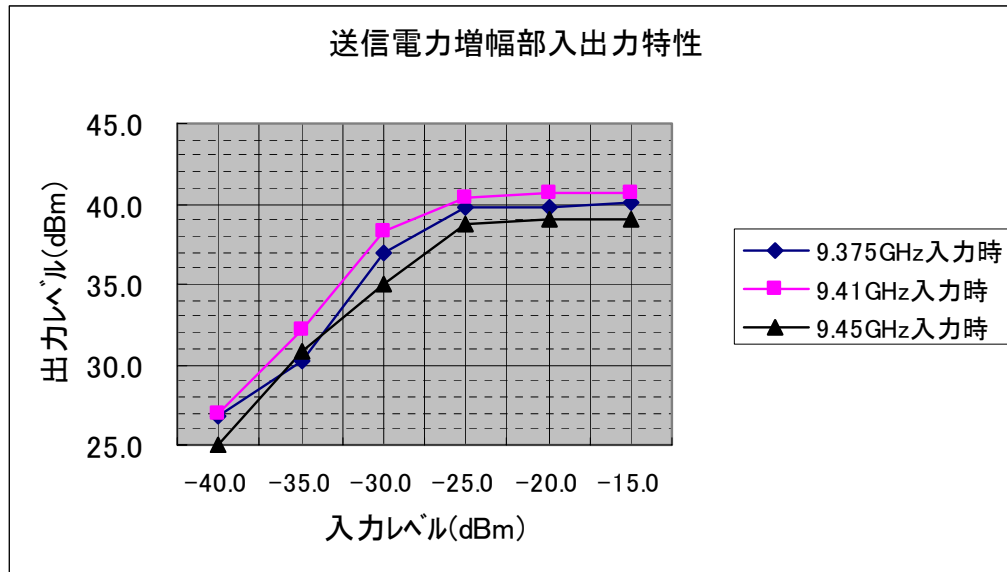


図7 PA部入出力特性

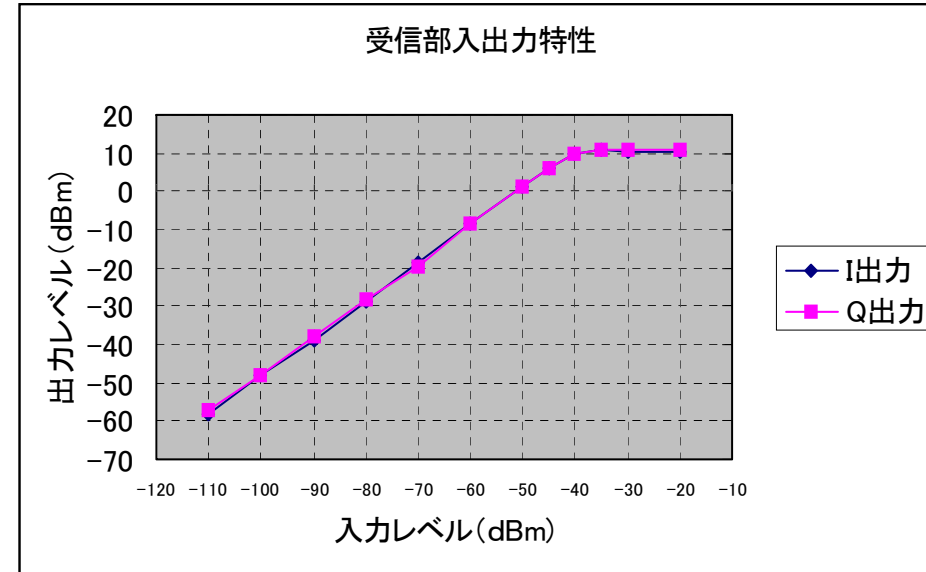


図8 受信部入出力特性

DDSの出力特性

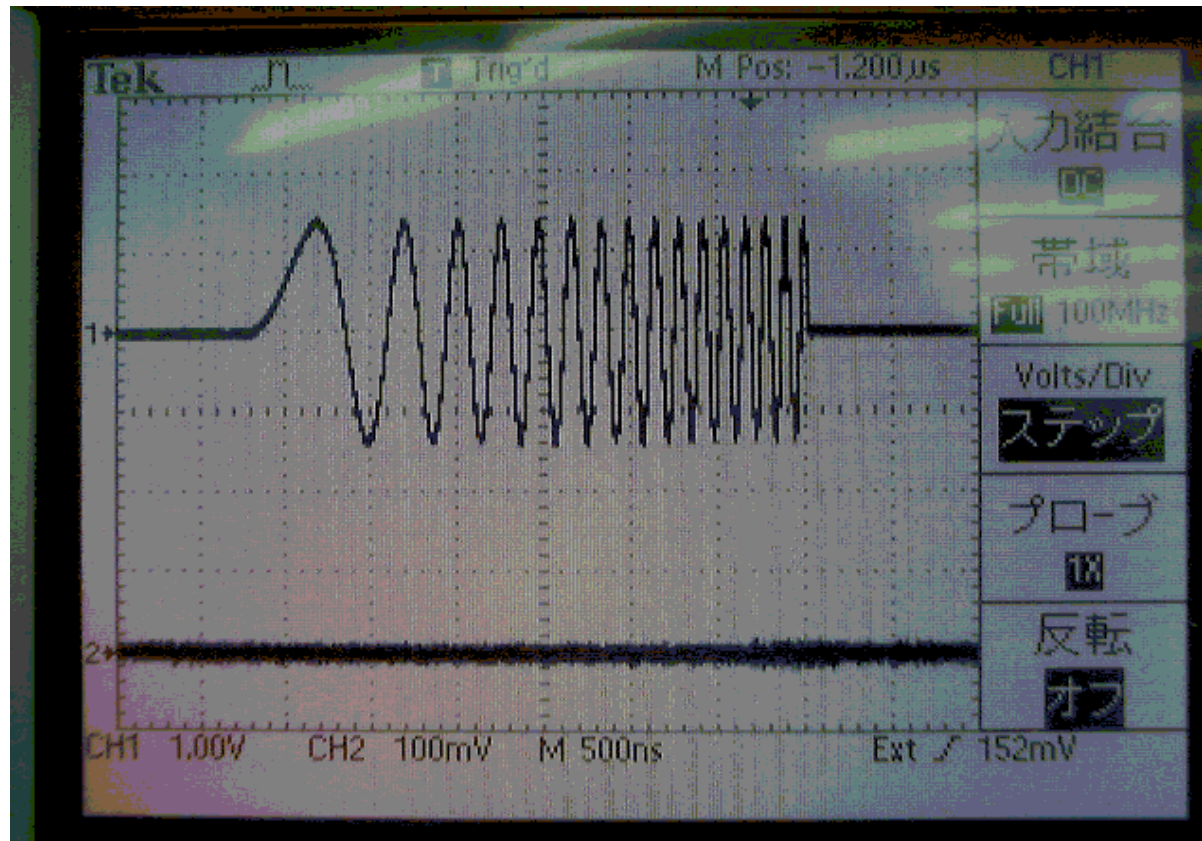


図9 チャープ信号

実験局の申請

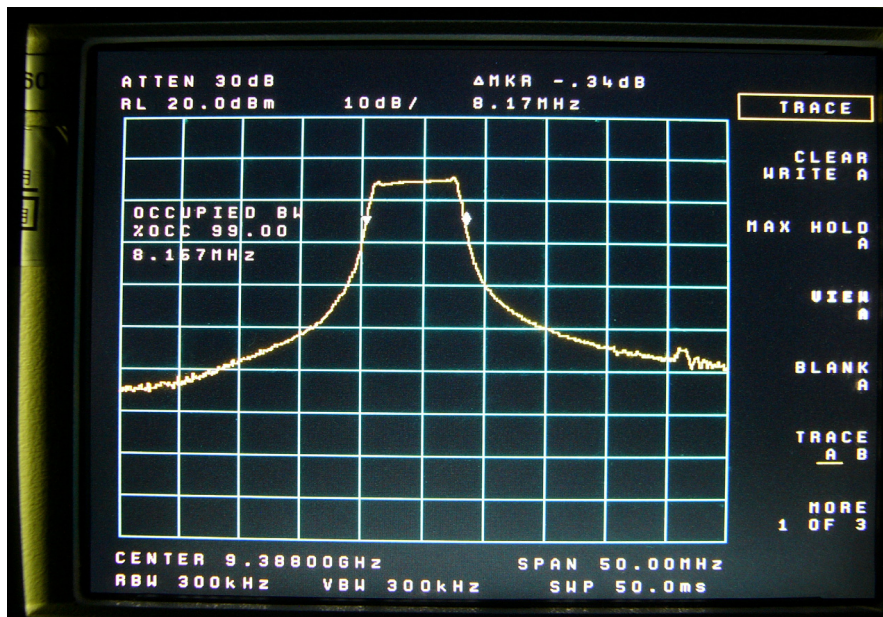


図10 占有帯域幅測定



図11 PEAK電力測定

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

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。

40dB/decadeはITUで検討中

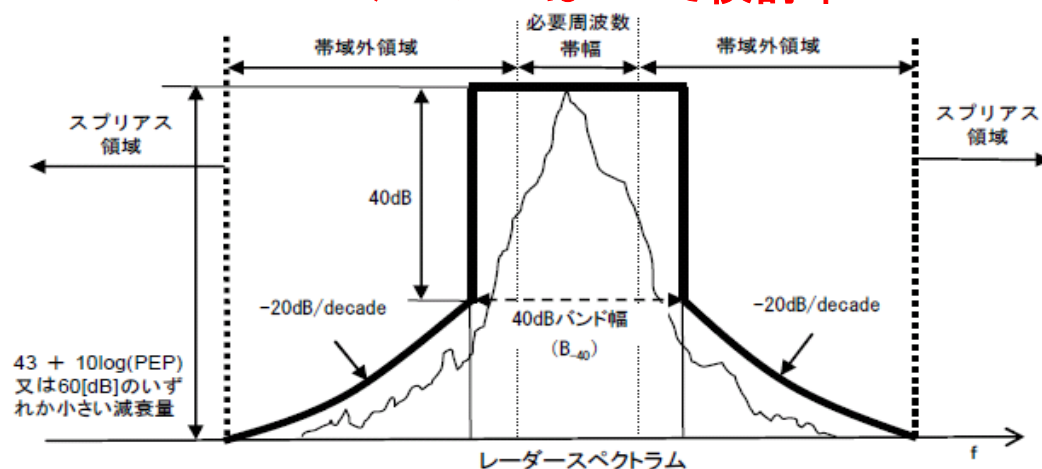


図12 一次レーダにおけるスプリアス領域と帯域外領域の境界

非FMパルス変調レーダ

$$B_{-40} = \frac{k}{\sqrt{t \cdot t_r}} \text{ or } 64/t \text{ の小さいほう} \dots (9)$$

T:パルス幅、 t_r :立上がり時間

k:6.2(出力100kW以上)それ以外は7.6

FMパルス変調レーダ

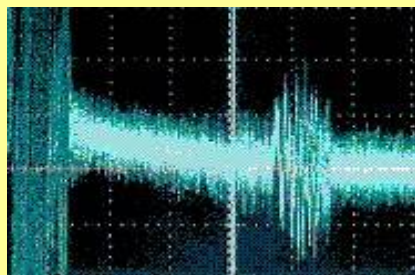
$$B_{-40} = \frac{k}{\sqrt{t \cdot t_r}} + 2(B_c + A/t_r) \dots (10)$$

A:k=6.2の時0.1054、7.6の時0.065

B_c :周波数偏差

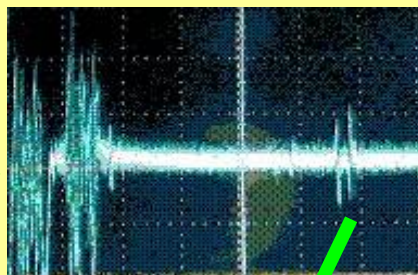
フィールドでの測定1

パルス圧縮方式受信信号

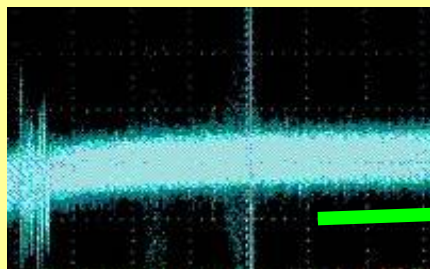


4.2W 3.2 μ

逆拡散後の信号

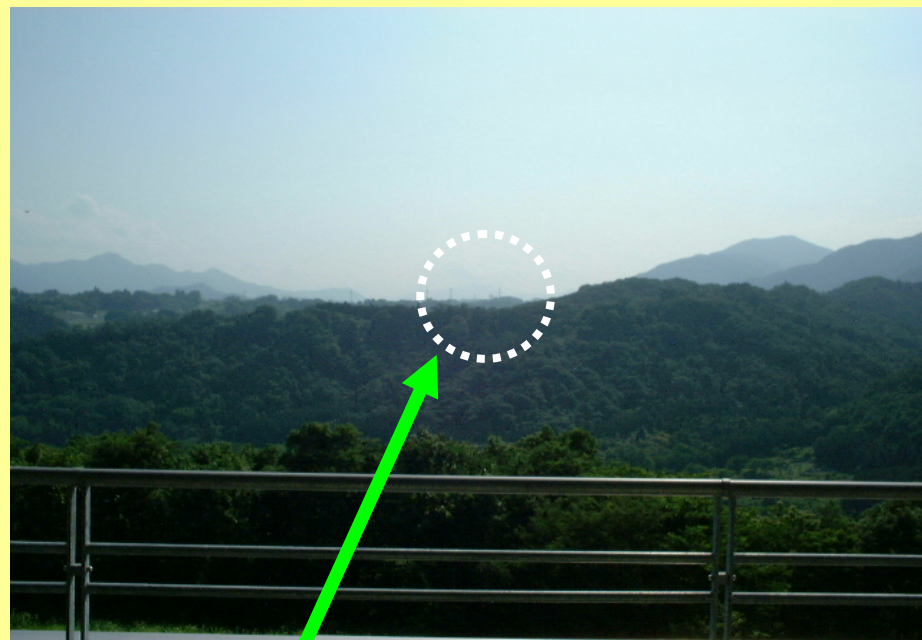
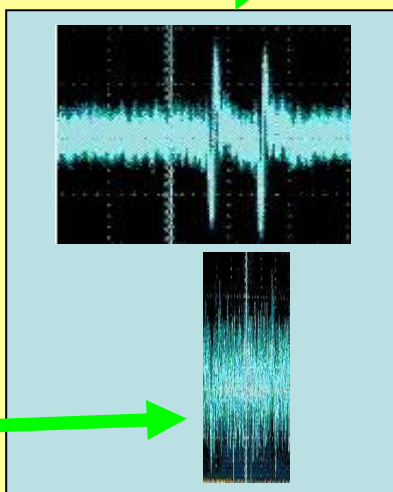


パルス方式受信信号



4.2W 100n

時間軸拡大

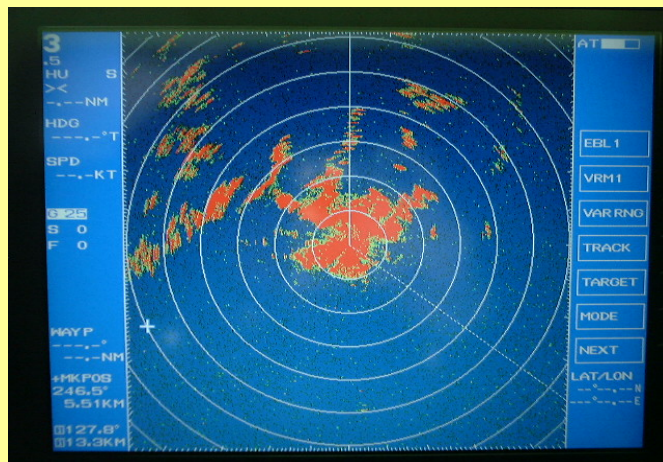


2本の鉄塔
距離:3.4km、間隔130m

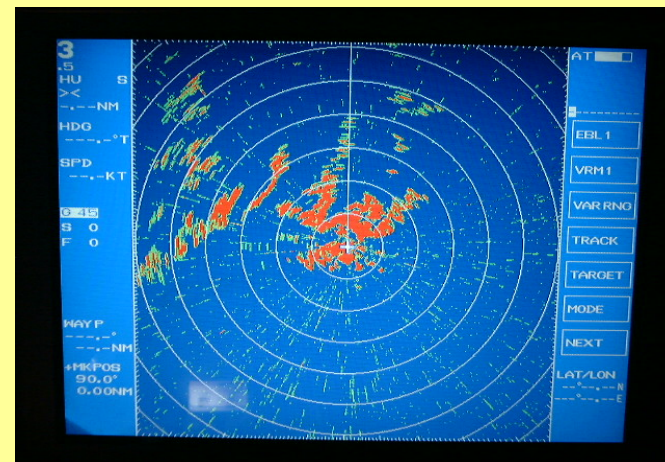
図13 パルス圧縮とパルス方式の受信信号比較

フィールドでの測定2

3nm



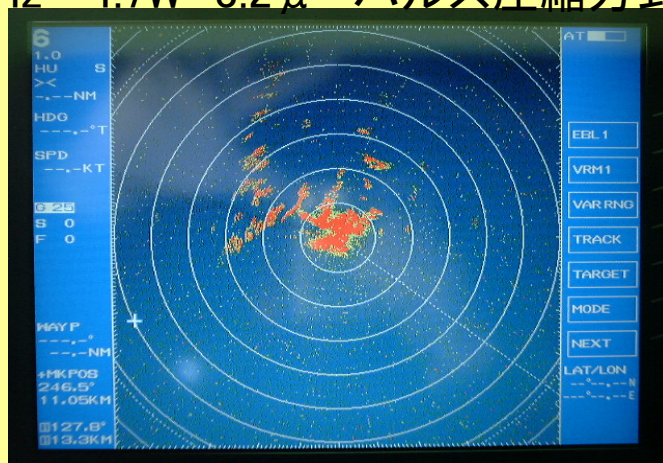
3nm



7.5MHz 4.7W 3.2 μ パルス圧縮方式

1kW 80n パルス方式

6nm



3nm



7.5MHz 4.7W 3.2 μ パルス圧縮方式

1kW 250n パルス方式

図14 パルス圧縮とパルス方式の最大探知距離

フィールドでの測定3

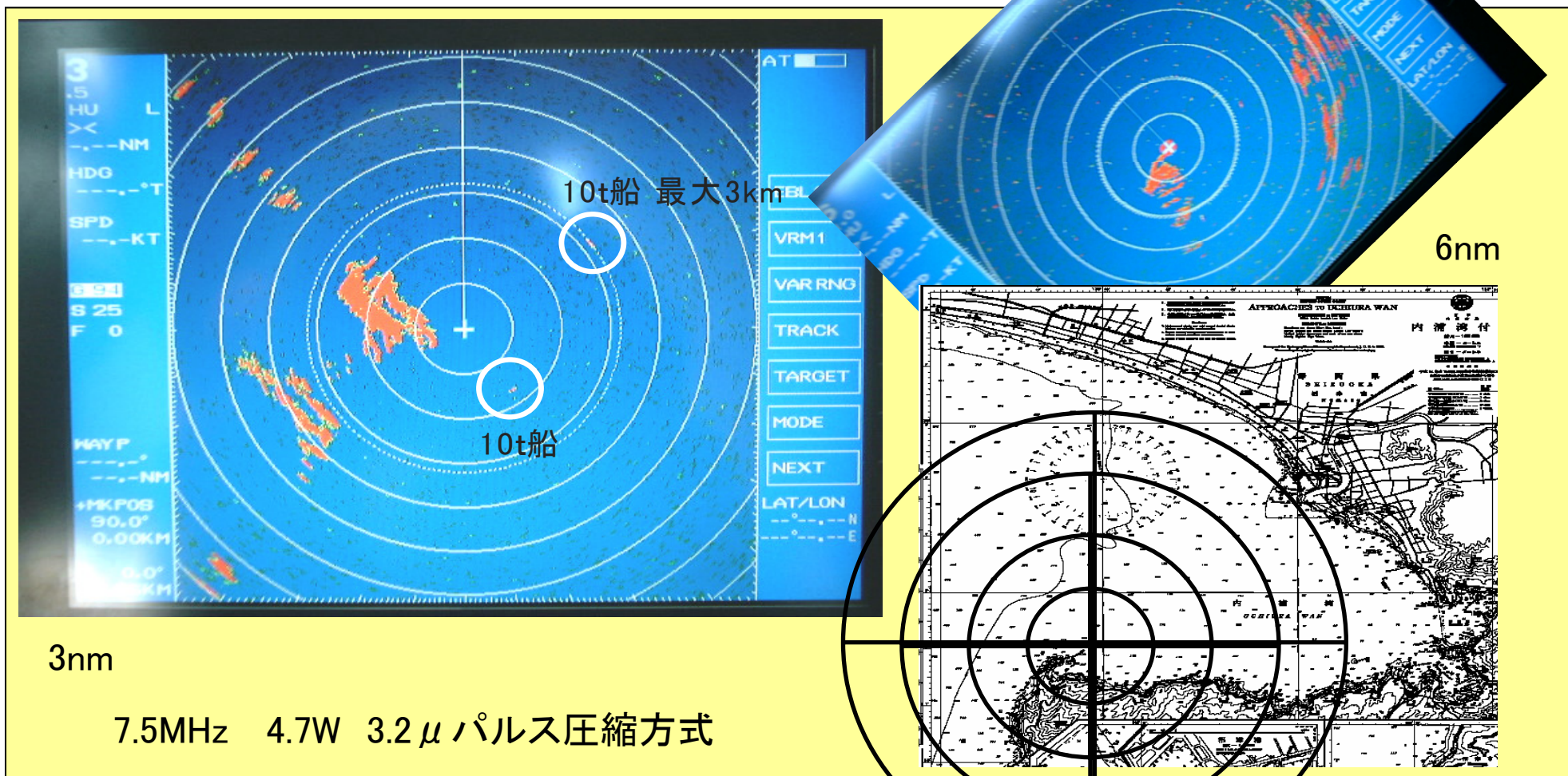


図15 海上実験
航法システム研究会

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)

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
- 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

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