

学位論文 博士（工学）

高出力 GaN 増幅器を用いた民生用および
惑星探査機再突入カプセル捕捉用
X 帯パルスレーダの研究

2019 年度

総合研究大学院大学物理科学研究科

宇宙科学専攻

林 大介

目次

図目次.....	iii
表目次.....	vi
Abstract.....	viii
アブストラクト.....	x
第1章 序論.....	12
1-1 研究背景.....	13
1-1-1 惑星探査とサンプルリターンミッション.....	13
1-1-2 再突入カプセル回収に関する課題.....	14
1-1-3 各種レーダの可搬性・輸出性と探知距離.....	15
1-1-4 船舶用レーダを取り巻く状況.....	17
1-2 本研究の目的と意義.....	18
1-3 本論文の構成.....	19
1-4 文献.....	20
第2章 惑星探査機再突入カプセル捕捉用システムの探知距離性能に関する実現性検討.....	22
2-1 惑星探査機再突入カプセル捕捉用システムの探知距離性能.....	23
2-2 レーダの要件設定.....	26
2-2-1 電氣的性能の設定.....	26
2-2-2 アンテナの回転速度.....	27
2-2-3 アンテナの設置仰角.....	28
2-2-4 レーダ要件の整理および基本性能.....	30
2-3 提案システムにおけるレーダ配置のルール化.....	33
2-4 提案システムにおける探知距離性能の試算.....	37
2-5 文献.....	40
第3章 パルス動作型高出力 GaN 増幅器の試作.....	41
3-1 パルス動作型高出力 GaN 増幅器.....	42
3-2 高出力 GaN 増幅器の試作.....	44
3-2-1 回路構成と設計手法.....	44
3-2-2 製作構造と製作手法.....	48
3-2-3 基本性能評価.....	50
3-2-4 合成による GaN 増幅器の高出力化.....	52
3-3 使用条件の差異に着目をしたパルス信号の時間波形評価.....	60
3-3-1 測定系と測定結果の定義.....	60
3-3-2 使用条件の差異による時間波形への影響.....	64
3-3 増幅器入出力間の波形形状に着目をした評価とパルス波形歪の低減手法提案.....	73
3-3-1 測定系と測定結果の定義.....	73
3-3-2 パルス波形歪とそのパルス圧縮への影響.....	74

3-3-3	パルス波形歪の低減手法提案	77
3-3-4	提案手法の効果の確認	78
3-4	文献	81
第4章	高出力 GaN 増幅器を用いた X 帯パルスレーダの構築と搜索性能の実証	82
4-1	高出力 GaN 増幅器を用いた X 帯パルスレーダの構築	83
4-1-1	高出力 GaN 増幅器のモジュール化	83
4-1-2	送受信機	86
4-1-3	試作レーダの構築と受信特性	88
4-2	小型飛翔体を用いた遠距離探知試験による搜索性能の実証	92
4-2-1	試験用レーダの仕様	92
4-2-2	試験内容	93
4-2-3	試験結果	95
4-2-4	搜索性能の実証	99
4-3	遠距離探知試験結果に基づいた実運用に向けた考察	106
4-3-1	環境雑音に関する検討	106
4-3-2	自律制御および追跡能力向上に向けた考察	107
4-4	文献	110
第5章	将来に向けた展望	111
5-1	より広範な搜索範囲への対応	112
5-2	フェーズドアレー技術の導入	113
5-3	文献	115
第6章	結論	116
	謝辞	119
	論文リスト	120

図目次

図 1-1	主なレーダの分類と用途	16
図 1-2	船舶用レーダの外観	17
図 2-1	提案システムでの再突入カプセル捕捉イメージ（水平面）	25
図 2-2	ファンビームパターン	25
図 2-3	P0N と Q0N を併用した測定の概念図	27
図 2-4	アンテナ設置仰角ごとの垂直断面の探知距離	29
図 2-5	検出確率ごとの垂直断面の探知距離	30
図 2-6	距離に対する SNR の試算結果 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$)	31
図 2-7	高度ごとの水平面探知範囲 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $E_l = 10 \text{ deg}$)	32
図 2-8	高度ごとの水平面探知範囲 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)	33
図 2-9	レーダ 1 局での搜索可能範囲 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)	34
図 2-10	短軸距離が 6.9 km 以下の場合の配置ルール	34
図 2-11	配置ルール 1 の補足説明	35
図 2-12	短軸距離が 6.9 km 以上 18.1 km 以下の場合の配置ルール	35
図 2-13	配置ルール 2 の補足説明	35
図 2-14	短軸距離が 18.1 km 以上の場合の配置ルール	36
図 2-15	提案システムにおけるレーダ配置ルール	36
図 2-16	はやぶさ実績に対する搜索範囲性能 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)	37
図 2-17	STARDUST 実績に対する搜索範囲性能 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)	38
図 2-18	GENESIS 実績に対する搜索範囲性能 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)	39
図 3-1	50 W 出力級 GaN 増幅器の整合回路構成	44
図 3-2	ゲートスイッチング方式におけるバイアス回路構成	45
図 3-3	50 W 出力級 GaN 増幅器の設計手法	46
図 3-4	バイアス回路の設計結果	47
図 3-5	50 W 出力級 GaN 増幅器の設計結果（回路図）	47
図 3-6	50 W 出力級 GaN 増幅器の設計結果（パターン図）	48
図 3-7	50 W 出力級 GaN 増幅器の S パラメータシミュレーション結果	48
図 3-8	ベアチップ周辺の断面構造	49
図 3-9	50 W 出力級 GaN 増幅器の外観	50
図 3-10	高出力増幅器の基本性能評価における測定系	51
図 3-11	試作した 50 W 出力級 GaN 増幅器の S パラメータ測定結果	51
図 3-12	試作した 50 W 出力級 GaN 増幅器の中心周波数における入出力特性の測定結果	52
図 3-13	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果_S11	53

図 3-14	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__S21.....	54
図 3-15	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__S22.....	54
図 3-16	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__最大出力特性.....	55
図 3-17	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__最大出力時利得.....	55
図 3-18	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__ドレイン効率.....	56
図 3-19	複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__電力付加効率.....	56
図 3-20	試作したウィルキンソン型電力合成・分配回路.....	57
図 3-21	試作したウィルキンソン型電力合成・分配回路の測定結果.....	58
図 3-22	100 W 出力級 GaN 増幅器の外観.....	58
図 3-23	導波管構造の 8 合成回路の例.....	59
図 3-24	パルス動作時の挙動調査における測定系.....	60
図 3-25	オシロスコープの取得波形例.....	61
図 3-26	ゲートバイアスの立ち上がり，立ち下がり特性.....	62
図 3-27	GaN 増幅器の高周波信号出力の立ち上がり，立ち下がり特性.....	63
図 3-28	基本設定における測定結果.....	65
図 3-29	出力レベルを変化させた場合における振幅・位相の測定結果.....	66
図 3-30	パルス幅を変化させた場合における振幅・位相の測定結果.....	67
図 3-31	デューティ比を変化させた場合における振幅・位相の測定結果.....	68
図 3-32	パルス幅に対する振幅・位相の変動幅の複数台比較.....	69
図 3-33	周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の測定結果.....	70
図 3-34	周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の測定結果（2 台目）.....	71
図 3-35	周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の測定結果（3 台目）.....	72
図 3-36	評価に供した増幅器の構成.....	73
図 3-37	評価に供した増幅器の入出力特性.....	73
図 3-38	増幅器入出力間のパルス波形測定系.....	74
図 3-39	パルス信号の時間波形.....	75
図 3-40	非線形性の試算結果（左）と測定結果の考察（右）.....	76
図 3-41	パルス圧縮後の時間波形.....	77
図 3-42	提案手法の概念図.....	78
図 3-43	提案手法におけるパルス信号の時間波形.....	79
図 3-44	提案手法におけるパルス圧縮後の時間波形.....	80
図 3-45	パルス圧縮後の時間波形比較.....	80
図 4-1	試作したレーダのブロック図.....	83
図 4-2	高出力 GaN 増幅器のブロック図.....	84
図 4-3	高出力 GaN 増幅器の内部構造.....	84
図 4-4	高出力 GaN 増幅器の熱シミュレーション結果.....	85
図 4-5	高出力 GaN 増幅器の外観.....	85
図 4-6	送受信機ブロック図.....	86
図 4-7	MF の処理ブロック図.....	86

図 4-8	MMF の処理ブロック図.....	87
図 4-9	MF と MMF の時間サイドロープの比較.....	87
図 4-10	送信信号波形とパルス圧縮処理の実測結果.....	88
図 4-11	試作レーダの外観と内部構造.....	89
図 4-12	受信特性の測定系.....	90
図 4-13	受信特性の測定結果.....	90
図 4-14	木更津海岸での実験結果.....	91
図 4-15	USC における遠距離探知試験の器材配置.....	94
図 4-16	検定球の吊り下げの様子と外観写真.....	95
図 4-17	遠距離探知試験の結果例.....	96
図 4-18	遠距離探知試験の結果例（気球の軌跡を重畳）.....	97
図 4-19	垂直断面の気球の軌跡と試験用レーダの予測性能.....	98
図 4-20	受信尖頭電力の実測結果.....	98
図 4-21	提案システムにおける垂直断面の探知距離性能.....	99
図 4-22	実測結果を基にしたはやぶさ実績に対する搜索範囲性能.....	100
図 4-23	実測結果を基にした STARDUST 実績に対する搜索範囲性能.....	101
図 4-24	実測結果を基にした GENESIS 実績に対する搜索範囲性能.....	102
図 4-25	垂直断面の探知性能に対する検出回数.....	103
図 4-26	PON の探知区間における距離方向距離分解能の実測結果.....	104
図 4-27	QON の探知区間における距離方向距離分解能の実測結果.....	104
図 4-28	方位方向の距離分解能の実測結果.....	105
図 4-29	環境雑音の測定環境.....	106
図 4-30	環境雑音に関する追加試験結果例.....	107
図 4-31	気球の自動判定例.....	108
図 4-32	気球の自動追跡結果.....	109
図 5-1	OSIRIS-REx の推定搜索範囲に対するレーダ配置.....	112
図 5-2	搜索範囲内への配置を許容した場合の OSIRIS-REx のレーダ配置.....	113
図 5-3	基本ユニットの構築構想.....	114
図 5-4	基本ユニットの組み合わせによるアンテナ性能イメージ.....	114

表目次

表 1-1	近年のサンプルリターンミッション	13
表 1-2	再突入カプセルの回収地とその搜索実績	15
表 1-3	はやぶさの実績におけるカプセル捕捉に関する課題	15
表 1-4	レーダによるドローン探知に関する報告例	17
表 2-1	はやぶさ実績における探知対象条件	23
表 2-2	国際海事機関 (IMO) が定める船舶用レーダが満たすべき探知距離	24
表 2-3	レーダ断面積の参考値	24
表 2-4	船舶用レーダの技術的条件案と提案システムにおける仕様	26
表 2-5	アンテナ回転速度に対するビジビリティファクタと検出回数および最大探知距離 ..	28
表 2-6	提案システムにおけるレーダの要件	31
表 2-7	カプセル高度に対する探知外径と探知内円の半径	33
表 2-8	短軸距離に対する長軸方向のレーダ配置間隔	36
表 2-9	各探査ミッションの実績に対する搜索範囲のカバー率	39
表 3-1	代表的な化合物半導体の物性	43
表 3-2	ベアチップと MMIC を用いた増幅器の比較	43
表 3-3	代表的な半田材料およびプレート材の熱伝導率	49
表 3-4	試作した 50 W 出力級 GaN 増幅器の大信号特性測定結果	52
表 3-5	50 W 出力級 GaN 増幅器の 5 台製作時の大信号特性比較	57
表 3-6	試作した 100 W 出力級 GaN 増幅器の大信号特性測定結果	59
表 3-7	ゲートバイアスおよび高周波信号出力の立ち上がり, 立ち下がり時間の測定結果 ..	63
表 3-8	基本設定における振幅・位相の変動幅	65
表 3-9	出力レベルを変化させた場合における振幅・位相の変動幅	66
表 3-10	パルス幅を変化させた場合における振幅・位相の変動幅	67
表 3-11	デューティ比を変化させた場合における振幅・位相の変動幅	68
表 3-12	周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の変動幅	70
表 3-13	送信信号諸元	74
表 3-14	パルス信号の時間特性比較	76
表 4-1	高出力 GaN 増幅器の実測結果	85
表 4-2	試験用レーダの仕様	92
表 4-3	実測値と計算値の差分整理	99
表 4-4	試験結果を基にした各探査ミッションの実績に対する搜索範囲のカバー率	100
表 5-1	OSIRIS-REx の推定搜索範囲に対するカバー率	113
表 5-2	搜索範囲内へのレーダ配置を許容した場合の OSIRIS-REx のカバー率	113

記号

σ	レーダ断面積	m ²
P_t	送信尖頭電力	W
G	アンテナ利得	dBi
λ	波長	m
k	ボルツマン定数	J/K
T_s	システム雑音温度	K
L_m	マッチング損失	dB
R	物標までの距離	m
L_s	システム損失	dB
V_0	ビジビリティファクタ	dB
P_d	検出確率	-
P_f	誤検出確率	-
M	サンプル数	-
θ	アンテナの水平ビーム幅	deg
f_r	繰り返し周波数	Hz
ω	アンテナ回転速度	rpm
E_l	アンテナ設置仰角	deg
P_a	搜索範囲のカバー率	%
P_r	受信尖頭電力	dBm
$N_{d\ min}$	最小検出回数	-
T_{cp}	カプセルの降下に要する時間	s
L_{cp}	カプセルの降下距離	m
V_{cp}	カプセル降下速度	m/s
H_d	提案システムにおける高度方向の搜索可能範囲	m
R_c	海面反射の強度傾斜の分岐距離	m
H_s	海面高	m
H_e	アンテナの設置高度	m

Abstract

Sample return missions for planetary exploration require recovery of re-entry capsules bearing the returned samples. Such recovery requires a search system, because a capsule measuring tens of centimeters falls into a predicted arrival area spanning tens of kilometers. The Hayabusa mission—the first successful sample return from an astronomical body other than the moon—utilized a monitoring system for detecting a beacon mounted on the capsule along with a primary radar system operated by the Australian military. However, a similar system may be problematic in future exploration. One potential issue is failure of beacons or other capsule-borne equipment. Although a primary radar can be effective in such an event, the portability of the Australian radar system is limited and cannot flexibly adapt to sudden changes in arrival area. In addition, there is a desire to establish equipment for recovery without relying on other countries.

This research proposes the dual use system for space and civil-use utilizing X-band solid-state marine radar to solve above issues. Although marine radars have shorter maximum detection ranges compared with large radars developed for military, the proposed system combines multiple units capable of capsule search. Development of a solid-state radar realizing a pure spectrum through effective use of frequency bands is promising for future missions, but these types of radar are currently limited by their relatively small power output. Although they are currently commercially available for detection of small ships at short ranges, there is a strong need to develop high-power solid-state radars for large ships. The same applies to the recovery of re-entry capsules. Hence, this research aims at constructing technologies for high-power X-band solid-state marine radar as well as a radar system for re-entry capsule search.

First, feasibility studies were conducted focusing on detection range, which is the most important aspect of performance for the proposed system. The radar specification was set to obtain a longer detection range without violating technical conditions for solid-state marine radar. The transmission power was set to 400 W, the assumed maximum for marine use, and the pulse width and repetition frequency were respectively set to 22 μ s and 3000 Hz, the upper limits in the technical conditions. Marine radars generally have an antenna rotation speed of 24 rpm, but this was set to 6 rpm to improve the signal-to-noise ratio (SNR). To reduce ground-reflected waves and detect the capsule at higher altitudes, the antenna was assumed to tilt upward. Based on these conditions, the placement rules for multiple radars were defined, and the searchable area of the proposed system was estimated based on the achievements of Hayabusa, STARDUST, and GENESIS. The results confirmed that the proposed system can search for a capsule over at least 96.8 % of the predicted arrival area.

Next, high-power amplifiers were developed for the higher output power of X-band solid-state marine radar. Several X-band solid-state marine radar products are commercially available, but their transmission outputs are limited to around 40 W. This is not only because high-power X-band amplifying devices are more expensive than traditional electron tubes, but also because equipment size and price range hinder heat dissipation mechanisms capable of operating in severe environments. Therefore, in this study, amplifiers were fabricated using a bare gallium nitride (GaN) chip with excellent thermal conductivity, band gap, and breakdown voltage characteristics, allowing it to handle higher output power than a gallium arsenic (GaAs) chip of the same size. For miniaturization, a matching

circuit was designed with the minimum specifications required by the system, and the efficiency of heat dissipation was improved by using fabrication methods proven for space use. As the result, a single-ended GaN amplifier with dimensions of 9 mm x 5 mm was fabricated using a single die and a printed circuit board, and it operated with maximum output power of 69.2 W, gain of 8.2 dB, and DC–RF efficiency of 39.3% at 9.4 GHz. Combining two amplifiers produced over 100 W output power, demonstrating the potential for even higher output.

In the pulse compression implemented in solid-state radars, the time waveform of the pulse signal is important for greater detection accuracy. Therefore, in this research, the amplifiers described above were evaluated with a focus on operating conditions and differences in input and output pulse waveforms. Evaluations of the pulse waveform showed that influences of nonlinear operation and transient response increased the temporal slope and the pulse width by 79.6 % and 1.5 %, respectively, as compared with the input waveform. Further, these influences degraded SNR after pulse compression. When assuming characteristic changes according to operating conditions, a feedback circuit is generally used to compensate for such distortion. Adding such a circuit, however, hinders miniaturization. This research proposes a method for reducing such influences by adding dummy signals before and after the desired signal. By the proposed method, shape difference of the pulse waveform was nearly eliminated, and the SNR after pulse compression improved by about 5 dB. Although this method involves a wider pulse, operation in electrically and thermally stable regions can be secured with no feedback circuit, contributing to miniaturization and cost reduction of the radar.

Finally, a prototype radar was constructed using the above-mentioned 50 W and 100 W amplifiers and the newly developed transceiver, and the search performance of the proposed system was demonstrated based on actual measurement results. In the long-range detection experiment, the object with the radar cross section of 0.159 m² could be detected up to 17.5 km. And based on the results, the proposed system was confirmed to search with 100 % coverage of the achievements of Hayabusa, STARDUST and GENESIS. In searchable areas, the detection of the capsule was more than 37.5 times. Resolution in the distance direction to the radar was 150 m or less, and resolution in the azimuth direction was 230 m or less based on the experimental data. This level of performance can contribute to re-entry capsule recovery missions.

This research introduces new perspectives such as dual use for space and civil-use, and furthermore demonstrates a re-entry capsule tracking system based on actual measurements. In addition, this research developed technologies for high-power portable radar and to propose a reduction method for pulse wave distortion, common problems for both space and civil-use radars. These results will contribute to future re-entry capsule recovery missions.

アブストラクト

サンプルリターンを伴う惑星探査の最終ミッションに、サンプルを搭載して地球に帰還する再突入カプセルの回収がある。このミッションでは直径数十cmのカプセルが数十kmにも及ぶ広大な降着予想範囲に落下するために搜索システムが必要となる。世界で初めて月以外の重力天体からのサンプルリターンを果たしたはやぶさでは、カプセルに搭載されたビーコンを探知するビーコン探査局とオーストラリア軍が保有する1次レーダがこの搜索に用いられた。しかし将来的な探査に向けては課題があると考えられる。まずカプセル搭載機器の故障は必ず想定しなくてはならない。これには1次レーダが有効であるが、オーストラリア軍のレーダは装置規模から突発的事態による降着予想範囲の変更への対応が難しい。また回収に関わる器材を他国に頼ることなく確立させたいという欲求もある。

本研究ではこれらの課題に対し、X帯の船舶用固体レーダを用いた宇宙用・民生用のデュアルユースシステムを提案する。船舶用レーダは防衛用などの大型なレーダと比べると最大探知距離は乏しいが、複数を協調動作させることによりカプセルの捕捉が可能であると考えた。現行の船舶用レーダは送信信号の生成にマグネトロンを用いたものが主流ではあるが、将来性を見据え、周波数資源の有効利用の観点などから今後主流となっていくだろう固体レーダを検討対象とした。しかしこれには送信尖頭電力に課題がある。現在市販されている船舶用固体レーダは探知距離が短い小型船舶のみであるが、大型船舶向けの高出力品の開発が望まれている。カプセル回収ミッションに対してもその最大探知距離は課題となる。そこで本研究では宇宙用と民生用の共通の課題となるX帯船舶用固体レーダの高出力化に向けた要素技術構築と、その成果を用いた再突入カプセル捕捉システムの実測ベースでの実証を目的とした。

研究ではまず提案システムにおいて最も重要となる探知距離性能に着目をしたフィージビリティスタディを行った。レーダ単体の仕様は船舶用固体レーダの技術的条件を逸脱しない範囲でより長い探知距離が得られるように設定した。送信尖頭電力を船舶用としては最大と考えられる400 Wで設定し、パルス幅・繰り返し周波数を技術的条件の上限である22 μ s, 3000 Hzとした。加えてアンテナ回転速度に関しては、船舶用レーダでは24 rpmが一般的であるが、6 rpmまで低減させることで信号対雑音電力比(SNR)の改善を試みた。またアンテナを高度方向に傾けて配置することで、大地反射波の低減とより高高度からの探知が可能にさせた。これらの要件を基に複数レーダの配置ルールを定義し、はやぶさやSTARDUST、GENESISの搜索範囲実績に対する性能を試算した結果、いずれにおいても96.8%以上の範囲でカプセル捕捉が可能になったことがわかり、提案システムの有用性が確認できた。

次にX帯船舶用固体レーダの高出力化に向け、高出力増幅器の要素技術構築を行った。X帯の船舶用固体レーダは現在導入の過渡期であり、いくつかの製品が入手可能であるが、提案システムで想定するような高出力タイプは市販されておらず、その出力は未だ40 W程度である。これは単にX帯の高出力増幅素子がマグネトロンと比較して高価であることに加え、厳しい使用環境に対し、装置規模や価格帯の観点から十分な放熱機構が用意できないことも関係する。そこで本研究では増幅用の半導体デバイスに、熱伝導率、バンドギャップ、耐圧等に優れ、Gallium arsenic (GaAs) と同等のサイズでも大きな電力を扱える Gallium nitride (GaN) のベアチップを用いて増幅器を試作した。整合回路をシステムで必要とする最小限の仕様で設計することにより小型化を図り、宇宙機搭載用として実績のある製造方法により排熱の効率化も図った。結果として1つのベアチップとプリント基板により9 mm \times 5 mmの増

幅回路を実現し、周波数 9.4 GHz およびパルス幅 10 μ s、デューティ比 10 %において、最大出力 69.2 W で利得 8.2 dB、効率 39.3 %を得ることができた。またこの増幅器を 2 つ合成することによって 100 W を超える高出力化にも成功し、さらなる高出力化に向けためどを得ることもできた。

一方固体レーダで行われるパルス圧縮処理においては、より高精度な探知のために、パルス信号の時間波形が重要となる。そこで本研究では試作した高出力 GaN 増幅器を用い、出力レベルやパルス幅などの信号諸元や周囲温度の変化に対する挙動の評価、および増幅器の入出力間におけるパルス波形の形状差異に着目をした評価を行った。このうちパルス波形の形状差異の評価では、高出力 GaN 増幅器の非線形動作および過渡応答の影響により、増幅器の出力波形は入力波形に対し振幅の時間傾斜が最大で 79.6 %、見かけ上のパルス幅が最大で 1.5 %増加して、パルス圧縮結果に SNR の劣化として現れることがわかった。使用条件による特性変化を想定した場合、こうした歪に対しては一般的にフィードバック回路を用いた補償が行われるが、この回路の追加は小型化の観点では望ましくない。そこで本研究では所望信号の前後にダミー信号を付加することでこの影響を低減する手法を提案する。提案手法により増幅器入出力間におけるパルス波形の形状差異が軽減され、パルス圧縮後の SNR が 5 dB 程度改善した。この手法はパルス幅の増大を伴うが、フィードバック回路を使用せずに電氣的、熱的に安定した領域での動作が確保できるため、小型かつ安価にレーダを構築したい場合には有効であると考えられる。

最後に、試作した 50 W および 100 W 出力級の増幅器に送受信機も開発して試作レーダを構築し、その実測結果を基に提案システムの搜索性能の実証を行った。小型飛行体を用いた遠距離探知試験ではレーダ断面積 0.159 m² の物標に対して直線距離で 17.5 km もの遠距離での探知に成功し、その結果に基づいた搜索範囲性能の検証では、はやぶさや STARDUST、GENESIS の搜索範囲実績に対して 100 % のカバー率でカプセル捕捉が可能であることを確認した。カプセルの検出回数については、この搜索範囲性能の結果から、すべての搜索範囲実績に対して 37.5 回以上の検出が可能であることがわかり、このときの検出距離分解能は、遠距離探知試験の結果からレーダに対する距離方向で 150 m 以下、方位方向で 230 m 以下となることを確認した。これらの値はいずれもカプセル回収ミッションに貢献できるものと考えられる。

宇宙用と民生用とのデュアルユースといった新しい観点を導入し、それらの共通課題となる可搬型レーダの高出力化およびパルス波形歪に対するリーズナブルな低減手法の提案を行って、実際のミッションに寄与し得るシステムの実現性を実測ベースで示したことが本研究の成果であると考えられる。

第1章 序論

1-1 研究背景

1-1-1 惑星探査とサンプルリターンミッション

惑星探査は科学の進歩や資源採掘、惑星防衛の研究対象など、多くの意義を持つ重要なテーマである。「始原天体」と呼ばれる小惑星や彗星の土壌サンプルは地球などの大きな天体では失われた太陽系の起源やその進化に関する情報を持つ可能性があり、科学の進歩に対して非常に重要な意義を持つ。資源採掘についてはその所有権を定める国が出てきたり、将来的に人類が深宇宙へ進出した際の利用も模索されたりしている。惑星防衛の研究は甚大な被害をもたらさうる隕石からいかに地球を守るかといった分野の研究であり、危険な小惑星を破壊もしくは軌道変更により無害化する手法の研究に対しても惑星探査の成果が活用される^{[1]・[11]・[2]}。

惑星探査において土壌等のサンプルを採取し、地球に持ち帰るミッションをサンプルリターンミッションという。世界初のサンプルリターンはアメリカ航空宇宙局（NASA）のアポロ計画による有人での「月の石」の採取である。その後旧ソビエトがルナ計画で月を対象とした無人でのサンプルリターンに成功した。月以外のサンプルリターンとしては NASA の STARDUST がある。これはヴィルト第 2 彗星を探査対象とし、1999 年に打ち上げられ、2006 年に無事サンプルリターンを果たした。その後、2001 年に打ち上げられた GENESIS (NASA) では太陽風から粒子を採取するミッションを行い、2004 年にサンプルを搭載したカプセルが大気圏に再突入したが、カプセル搭載のパラシュートが開傘しないというアクシデントに見舞われた。カプセルはそのまま地上に激突したが、壊れたカプセルから微量のサンプルを取り出すことはできている。我が国では 2003 年に打ち上げられたはやぶさ (JAXA) がさまざまな困難を乗り越え、2010 年に世界初の月以外の重力天体からのサンプルリターンに成功した。この成功により、日本は深宇宙探査技術において世界をリードする立場となったと言える。2011 年には火星探査を目的としてロシアのフォボス・グルントが打ち上げられたが、これは失敗に終わっている。現在運用中のものとしては、小惑星リュウグウを探査対象としたはやぶさ 2 (JAXA)、ベンヌを対象とした OSIRIS-REx (NASA) がある。はやぶさ 2 は 2018 年 6 月に無事リュウグウに到着し、2019 年 2 月にはタッチダウンによるサンプル採集、4 月にはこれも世界初となる小惑星のクレータ作製に成功しており、2020 年末の帰還を予定している。成功すれば初代はやぶさに続く世界で 2 番目の小惑星からのサンプルリターンとなり、この日本独自の技術を進展させることで、宇宙探査の一翼を牽引したいというのが、本ミッションの工学・科学技術的側面である。

表 1-1 近年のサンプルリターンミッション

名称	実施国	探査対象	打ち上げ	帰還
STARDUST	アメリカ	ヴィルト第 2 彗星	1999 年	2006 年
GENESIS	アメリカ	太陽風	2001 年	2004 年
はやぶさ	日本	イトカワ	2003 年	2010 年
フィボス・グルント	ロシア	フォボス	2011 年	失敗
はやぶさ 2	日本	リュウグウ	2014 年	2020 年 (予定)
OSIRIS-REx	アメリカ	ベンヌ	2016 年	2023 年 (予定)

1-1-2 再突入カプセル回収に関する課題

サンプルリターンを伴う惑星探査における最終ミッションはサンプルを搭載した再突入カプセルの回収である。初代はやぶさでは、採取した物質を搭載したカプセルは本体と切り離された後に大気圏に突入し、高度 5 km でパラシュートを開傘、緩降下しながらオーストラリアのウーメラ砂漠に降着した^[1-3]。広大な砂漠地帯に直径 40 cm ほどのカプセルが降着することから、その位置特定には何らかの搜索手段が必要となる。STARDUST や GENESIS では 1 次レーダを主とし、それぞれカプセルに搭載されたビーコン発信機の信号探査、GPS 受信機による位置情報取得が搜索手段として用いられた。これらはともにアメリカユタ州にある Utah Test and Training Range (UTTR) が降着地域となっており、ここには RIR-980 と TPQ-39 といった送信尖頭電力 250 kW を超える大型なレーダが 2 機装備されている^{[1-4]-[1-6]}。現在運用中の OSIRIS-Rex についても降着地域は UTTR となっており^[1-7]、カプセルの設計が同等である STARDUST と同様な手段が取られるであろうと考える。

一方はやぶさでのカプセル回収は他国でのミッションとなった。この場合、十分な性能を持つ大型のレーダを独自に用意することは困難であり、ビーコン探査が主な手段となる。2010 年の回収ミッションではビーコンを追跡する地上 4 箇所の電波方向探査局とヘリコプター搭載の方向探査機がメインシステムとなり、オーストラリア軍が保有する 1 次レーダがバックアップとして用いられた。電波方向探査局による降着地点推定は±1 km 以内の精度を実現し、ヘリコプターによる搜索によってカプセルは再突入後約 1 時間で発見された。

しかし今後、惑星探査が活発化すると、順調なカプセル搜索ばかりではなくなるであろうと考える。カプセル搭載のビーコンが作動しないことや、突発的事態による降着範囲の変更なども起こりうるであろう。降着範囲の変更に対しては、メインシステムであるビーコン追跡システムは可搬性に優れるため柔軟に対応が可能であるが、バックアップシステムであった 1 次レーダは大型な装置であるため対応は難しい。また回収に関わる器材を他国に頼ることなく確立させたいという欲求もある。しかし我が国では十分な回収候補地を確保することが難しいことから、他国でのミッションが余儀なくされる場面も少なくないであろう。この場合回収機器の輸出性も課題となり、これは我が国固有の問題とも言える。この課題に対してもメインシステムであったビーコン追跡システムは基本的に受信系のシステムであるため輸出に関する障壁は少ないと考えるが、送信系の装置も含む 1 次レーダではワッセナーアレンジメント（通常兵器の輸出管理に関する国際的な申し合わせ）による制限が生じるため容易に輸出することはできない。以上よりカプセル搭載機器に頼らず、可搬性・輸出性に優れたバックアップシステムが必要であると考えられる。

表 1-2 再突入カプセルの回収地とその搜索実績

	STARDUST	GENESIS	はやぶさ	はやぶさ 2	OSIRIS-REx
回収地	UTTR (アメリカ)	UTTR (アメリカ)	ウーメラ砂漠 (オーストラ リア)	—	UTTR (アメリカ)
カプセル 搜索手段	1次レーダ ビーコン探査	1次レーダ GPS 受信機	ビーコン探査 1次レーダ	—	—
搜索範囲実績 (再突入直前 の予測値)	38.1 km ×8.2 km	41.9 km ×21.2 km	40 km ×3 km	—	—

表 1-3 はやぶさの実績におけるカプセル捕捉に関する課題

	ビーコン探査	オーストラリア軍 レーダ	備考
ビーコンの故障	× (探知不可)	○ (探知可能)	
降着予測地点の急な変更	○ (可搬性有)	× (可搬性低)	レーダの装置規模大
他国でのミッションへの 対応	○ (受信系装置のため輸出 障壁少)	× (別途準備が必要)	レーダは軍保有物のた め

1-1-3 各種レーダの可搬性・輸出性と探知距離

再突入カプセル捕捉に関する課題のうち「搭載機器に頼らない捕捉」に関しては、レーダの適用が最も適していると考えられる。本研究では民生用とのデュアルユースによるシステム構築を考えた。図 1-1 に主なレーダの分類と用途を示す^[1-8]。レーダは前の大戦中に集中的に開発・実用化された経緯もあることから陸海空の軍用目的での使用例が多岐にわたって存在するが、これらはワッセナーアレンジメントにより基本的には輸出が困難なものとなるため割愛した。宇宙用途としてはスペースデブリ観測のための MU レーダ^[1-9]や月惑星着陸誘導に用いるレーダ^[1-10]があり、業務用としては雨の連続観測を行う X バンド MP レーダ^[1-11]などがある。ただしこれらはいずれも固定局もしくは惑星探査機・衛星などへの搭載用であり、可搬型ではない。

一方民生用のレーダとしては船舶用と自動車用がある。船舶用レーダは船舶の航行の安全を保つための機器であり、国産船舶用レーダは世界シェアの 6 割以上を占め^[1-12]、世界各国で日本製のものを使用されている。使用する周波数帯としては S 帯 (2-4GHz) と X 帯 (8-12GHz) があり、基本的に船舶への搭載用ではあるが、X 帯では装置本体のサイズが比較的小さく、アンテナを取り外しての運搬が可能な構造であるため、可搬として取り扱うことができる (図 1-2)。探知距離は物標のレーダ断面積にもよ

るが、表示可能なレンジとしては最大で 96 NM (≒178 km) が用意されている^[1-13]。自動車用レーダは非常に小型であり、輸出も可能なものであるが、遠距離用でも 150 m 程度の探知距離であるためカプセル捕捉への適用は難しい。

また近年ではドローンなどの小型飛翔体探知に関する研究が盛んに行われている^{[1-14][1-21]}。低コスト化や小型化が進み、配達や放送、災害救助や農業など幅広い分野での活用が期待されていることから、今後ドローンの使用台数は飛躍的に伸びていくだろうと予想される。一方でその利便性からセキュリティやプライバシーの保護、テロへの脅威なども指摘されており、その対策としてレーダによる探知が多く研究されている。しかしレーダによるドローンの探知は困難な課題である。まず小型なドローンではレーダ断面積が 1.0 m² 以下と小さく、対象とするドローンの機体の大きさや材質、ブレードの有無や個数、姿勢や測定に用いる偏波などによりその値も大きく異なる。さらにブレードの回転によるクラッタも探知結果に影響を与える。研究内容としては探知性能に着目をして FMCW レーダ^{[1-14][1-15]}やチャープパルスレーダ^{[1-16][1-17]}などのさまざまな種類のレーダを用いた場合の探知結果に関するものや、ドローンのレーダ断面積自体に着目をしたものなどがある^{[1-19][1-20]}。探知対象のレーダ断面積や対空の探知である点でカプセル捕捉との類似性が高いが、これらの報告が対象とする探知距離は長くても数 km 程度であり、カプセル捕捉で必要とされる数十 km にもおよぶ搜索距離範囲での報告はない(表 1-4)。表 1-4 において最も探知距離の長いものは文献^[1-18]であり、この最小レーダ断面積 0.01 m² に対してカプセルのパラシュートに取り付けられた反射材のレーダ断面積は約 20 倍^[1-3]となるが、レーダの探知距離は断面積の 4 乗根でしか寄与しないため、仮にこの断面積を適用したとしてもその探知距離は 4200 m 程度であると想定する。以上より可搬性や対象とする探知距離の面で、X 帯の船舶用レーダがカプセル捕捉には最も適しているものと考えられる。

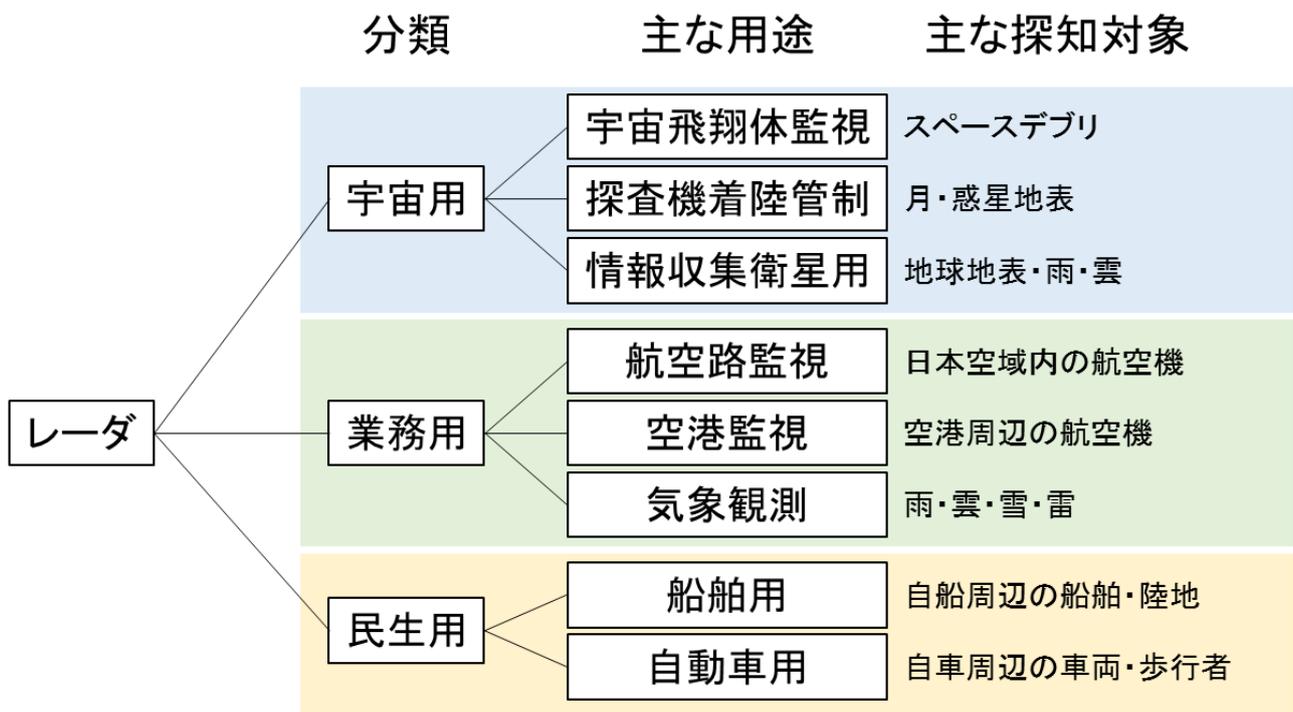


図 1-1 主なレーダの分類と用途



図 1-2 船舶用レーダの外観

表 1-4 レーダによるドローン探知に関する報告例

文献	レーダの種別	レーダ断面積	搜索距離範囲
[1-14]	FMCW	—	0 m – 1000 m
[1-15]	FMCW	—	0 m – 1000 m
[1-16]	チャープパルス	0.003 m ² – 0.07 m ²	0 m – 1000 m
[1-17]	チャープパルス	0.1 m ² – 1.0 m ²	0 m – 150 m
[1-18]	ユビキタス	0.01 m ² – 0.02 m ²	0 m – 2000 m
[1-19]	—	0.02 m ² – 0.3 m ²	—
[1-20]	—	0.001 m ² – 0.04 m ²	—
[1-21]	MIMO OFDM	—	0 m – 100 m

1-1-4 船舶用レーダを取り巻く状況

現在一般に入手可能な船舶用レーダは送信信号の生成にマグネトロンを用いたものが主流である。しかしマグネトロンには、不要発射が大きい、発射される信号の周波数が不安定など、信号品質に課題がある。無線通信のブロードバンド化に伴い、電波資源の有効利用の観点から、船舶用レーダに対してこれら課題の解決と、加えて占有周波数帯域幅の狭帯域化が求められている。また耐用期間の面でも課題がある。一般にマグネトロンの寿命は短く、常用で1年とも言われる^[1-22]。そのため定期的に交換が必要であり、ユーザーに維持費負担が生じてしまっているのが現状である。そのような中、通信機器の普及やその高速化への要求などから、近年窒化ガリウム (Gallium Nitride, GaN) を代表とした半導体デバイスの進歩が著しい。これまでは困難とされてきた、より高い周波数で、より高い出力が可能な半導体増幅器の開発が進んでいる。こうした背景を基に現在船舶用レーダは、マグネトロンを使用せず、半導体増幅器を用いた“固体レーダ”の開発が求められており、今後はこの種のレーダが主流になっていくと考える。

S帯の船舶用レーダではすでに固体化が完了しているが、S帯はその波長に比例して装置規模が大きくなる。そのため世界で使用されている船舶用レーダの95%はX帯である。X帯の固体レーダは現在開発の過渡期に当たり、いくつかの製品が入手可能であるが、その送信尖頭電力は未だ40W程度である(2018年7月末現在)。

1-2 本研究の目的と意義

前項までの背景を踏まえ、本研究では惑星探査機の再突入カプセル回収に寄与するカプセル捕捉用システムとして民生用とのデュアルユースシステムを提案し、宇宙・民生両者の課題となる高出力 GaN 増幅器に関する課題解決を図って、提案システムの実現性を実証することを目的とする。

民生用のレーダとしては X 帯の船舶用固体レーダを想定する。比較的小型であり、世界のほとんどの船舶に搭載されている X 帯を採用することにより、カプセル捕捉における課題である可搬性・輸出性の解決を図る。また将来的なミッションへの適用も見据え、今後主流になっていくと考えられる固体レーダを検討対象とする。船舶用固体レーダを用い、広大な搜索範囲において微小な再突入カプセルの捕捉を可能とするシステムの考案が、本研究におけるひとつめの課題である。

船舶用固体レーダの課題である高出力増幅器については、整合回路が内蔵されたモノリシック・マイクロ波集積回路 (Monolithic Microwave Integrated Circuit, MMIC) ではなく GaN のベアチップを用いて構築し、高出力で小型化な増幅回路実現を図る。加えて構築した増幅回路に対し、固体レーダの性能の根幹をなすパルス動作時の信号特性について仔細に評価を行う。この挙動についてはいくつかの報告があり、ベアチップの熱特性によって変動が生じることが報告されている^{[1-24]・[1-26]}が、パルス幅やデューティ比による挙動の変化や周囲温度に対する変化、増幅回路出力におけるパルス波形の歪など、より実用化に近づけるための報告は少ないため、この調査が重要であると考えた。特に問題となるパルス波形の歪については、歪補償のためのフィードバック回路を必要としない低減手法も提案する。船舶用レーダの可搬性に影響を与えない小型で高出力な GaN 増幅回路の実現と、実用レベルでのパルス動作特性の把握およびその歪低減手法の提案が本研究のふたつめの課題となる。

提案システムの実測ベースでの実証が、本研究における最後の課題である。そのため構築した増幅回路を用いた高出力増幅器のモジュール化に加え、送受信機能も付加して試作レーダを構築する。それを用いて提案システムで想定する距離・高度における小型飛翔体の遠距離探知試験を実施し、その結果から提案システムの有用性を示す。

宇宙用と民生用とのデュアルユースといった新しい観点を導入し、独自の器材を構築して、実際のミッションに寄与し得るシステムの提案を実測ベースで示すことが本研究の意義である。

1-3 本論文の構成

本論文の構成を説明する。本論文は全 6 章より構成される。以下、各章の概要を述べる。第 1 章では、本研究の背景、目的、および本論文の構成について記す。第 2 章では惑星探査機再突入カプセル捕捉用システムの課題を解決する民生用とのデュアルユースシステムのフェージビリティスタディとして、最も大きな課題である探知距離性能に着目をした検討結果を記す。第 3 章では、高出力・小型化を目的とした高出力 GaN 増幅回路について回路構成と設計手法およびその性能等について説明した後、この増幅回路のパルス動作時の挙動について信号諸元や周囲温度の違い、増幅回路入出力間のパルス波形歪に着目をした調査結果を報告し、パルス波形歪に対する低減手法を提案する。第 4 章では、第 2 章のフェージビリティスタディの結果を基に構築した試作レーダについて述べ、それをを用いて行った小型飛翔体の遠距離探知試験結果について述べる。その結果から提案システムの搜索性能を実証し、加えて実運用に向けた考察も記す。第 5 章では、第 4 章までで得られた知見から提案システムの将来に向けた展望について述べ、最後に第 6 章で本研究から得られた結論をまとめる。

1-4 文献

- [1-1] はやぶさ2プロジェクトホームページ. 宇宙航空研究開発機構.
<http://www.hayabusa2.jaxa.jp/science/>, (参照 2018 年 12 月)
- [1-2] 津田雄一: 小惑星探査機はやぶさ2のミッションと通信技術 MWE2017, WE2B-1, 2017 年 11 月.
- [1-3] 水野貴秀, 川原康介, 山田和彦: ビーコンを使った再突入カプセルの搜索システムとその運用, 日本航空宇宙学会誌 60 巻 7 号, pp. 250-256, 2012.
- [1-4] Prasun N. Desai and Garry D. Qualls: Stardust Entry Reconstruction, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, VOL. 47, NO. 5, pp. 736-741, Sept - Oct.2010.
- [1-5] Prasun N. Desai: Entry, Descent, and Landing Operations Analysis for the Genesis Entry Capsule, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, VOL. 45, NO. 1, pp. 27-32, Jan - Feb.2008.
- [1-6] David C. Jefferson, Darren T. Baird, Laureano A. Cangahuala, and George D. Lewis: Interfacing with USSTRATCOM and UTTR During Stardust Earth Return, AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference and Exhibit, Keystone, Aug.2006.
- [1-7] Thomas Ajluni, Timothy Linn, William Willcockson, David Everett, Ronald Mink, and Joshua Wood: OSIRIS-REx. Returning the Asteroid Sample, IEEE Aerospace Conference, MT, Jun.2015.
- [1-8] 伊藤信一: レーダシステムの基礎理論, コロナ社, 2015.
- [1-9] 河原淳人, 岩堀太紀, 山川宏, 佐藤亨, 山本衛, 橋口浩之: 京都大学 MU レーダーを用いたスペースデブリの観測手法に関する研究, 日本航空宇宙学会論文集, Vol. 64, No. 3, pp.189-199, 2016.
- [1-10] 福田盛介, 水野貴秀, 坂井智彦, 富田秀穂, 石丸元: 月惑星着陸誘導に用いる C バンドパルスレーダの開発, 信学技報, pp. 7-12, Nov.2004.
- [1-11] 土屋修一, 川崎将生, 五道仁実: 降雨減衰補正と合成雨量作成手法の改良による XRAIN 観測雨量の精度向上, 土木学会論文集, Vol. 71, No. 4, pp.I_457-I_462, 2015.
- [1-12] 電波政策 2020 懇談会サービス WG: 第3回サービスワーキンググループ取りまとめ 概要 資料 3-1, 2016.
- [1-13] MDC-7900 シリーズカタログ. 株式会社光電製作所.
<https://www.koden-electronics.co.jp/jp/marine/mdc/mdc-7920>, (参照 2018 年 7 月)
- [1-14] Dong-Hun Shin, Dae-Hwan Jung, Dong-Chan Kim, Jong-Wook Ham, and Seong-Ook Park: A Distributed FMCW Radar System Based on Fiber-Optic Links for Small Drone Detection, IEEE Trans, VOL. 66, NO. 2, pp. 340-347, Feb.2017.
- [1-15] Seungwoon Park, and Seong-Ook Park: Configuration of an X-band FMCW Radar Targeted for Drone Detection, ISAP2017, Phuket, July.2017.
- [1-16] Byung-Kwan Kim, Junhyeong Park, Seong-Jin Park, Tae-Wan Kim, Dae-Hwan Jung, Do-Hoon Kim, Taihyung Kim, and Seong-Ook Park: Drone Detection with Chirp-Pulse Radar

Based on Target Fluctuation Models, ETRI Journal, VOL. 40, NO. 2, pp. 188-196, Apr.2018.

- [1-17] Young-Kil Kwag, In-Sang Woo, Ho-Young Kwak, Young-Ho Jung: Multi-mode SDR radar platform for small air-vehicle Drone detection, 2016 CIE International Conference on Radar (RADAR), Guangzhou, Oct.2016.
- [1-18] Álvaro Duque de Quevedo, Fernando Ibañez Urzaiz, Javier Gismero Menoyo, Alberto Asensio López: Drone Detection With X-Band Ubiquitous Radar, 2018 19th International Radar Symposium (IRS), Bonn, June.2018.
- [1-19] Massimiliano Pieraccini, Lapo Miccinesi, Neda Rojhani: RCS measurements and ISAR images of small UAVs, IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, VOL. 32, Issue. 9, pp. 28-32, Oct.2017.
- [1-20] Jarez S. Patel , Francesco Fioranelli, David Anderson: Review of radar classification and RCS characterisation techniques for small UAVs or drones, IET Radar, Sonar & Navigation, VOL. 12, Issue. 9, pp. 911-919, Sept.2018.
- [1-21] Benjamin Nuss, Leen Sit, Michael Fennel, Jonathan Mayer, Tobias Mahler, Thomas Zwick: MIMO OFDM radar system for drone detection, 2017 18th International Radar Symposium (IRS), Prague, Aug.2017.
- [1-22] 情報通信審議会 情報通信技術分科会: 9GHz 帯船舶用固体素子レーダーの周波数共用等に関する調査検討報告書, 2013年11月.
- [1-23] 須藤正則, 菅原博樹, 沢柳雅哉, 山縣純次: X 帯船舶レーダー用 400W GaN 固体化増幅器, 日本無線技報 No.55, 2008, pp. 25-28.
- [1-24] Carlos G. Tua, Timothy Pratt, Amir I. Zaghoul: A Study of Interpulse Instability in Gallium Nitride Power Amplifiers in Multifunction Radars, IEEE. Trans Microwave, 2016, pp3732-3747.
- [1-25] 小野 哲, Mauro CIAPPA, 日浦 滋, 高木 茂行: 高速スイッチング用 GaN デバイスの定常および過渡状態での熱シミュレーション, エレクトロニクス実装学会誌 Vol.17 No.6, 2014, pp484-491.
- [1-26] Y. Deng, M. M. Islam, M. Gaevski, Z. Yang, V. Adivarahan, and A. Khan, "Determination of the Channel Temperature in GaN MOSHFETs under Microwave Operational Conditions," ISDRS 2007, December 2007.

第2章 惑星探査機再突入カプセル捕捉用システムの探知距離性能に関する実現性検討

2-1 惑星探査機再突入カプセル捕捉用システムの探知距離性能

本研究における提案システムは、再突入カプセルの搜索に当たり、十分な探知距離性能をもつ1次レーダの用意が困難であるという我が国固有とも言える課題に対し、可搬性・輸出性を有する民生用レーダで解決を図るといったものである。1次レーダに軍用で使用するような大型でかつ遠距離までの探知が可能な装置が用意できれば、多少の降着範囲の変更に対しては十分に対応が可能であるが、他国でのカプセル回収が多くなるだろう我が国でのミッションではそれは難しい。そこで本章では提案システムの探知距離性能に着目した実現性検討を行う。探知対象条件としては我が国の小惑星探査の実績であるはやぶさにおける条件^[2-1]を定義した。表 2-1 においてレーダ断面積は再突入カプセルのパラシュートに取り付けられた電波反射材のレーダ断面積である。搜索範囲はパラシュートが高度 5 km で開傘した場合の降着地点の予想範囲であり、風予報データやパラシュート開傘時の高度などから決定される。パラシュートの降下速度は 6 m/s であった。

表 2-1 はやぶさ実績における探知対象条件

項目	設定値
レーダ断面積	0.2 m ² ~0.5 m ²
降下速度	6 m/s
パラシュート開傘高度	5 km
搜索範囲	長軸 40 km 短軸 3 km の楕円

提案システムでは、民生用レーダとしては探知距離の長い船舶用レーダの適用を想定するが、表 2-1 のレーダ断面積と搜索範囲は船舶用レーダにとって探知の難しい条件となる。参考として国際海事機関 (International Maritime Organization, IMO) が代表的なレーダ断面積を持つ数種の物標に対して船舶用レーダが満たすべき探知距離を定めているが、その中で最もレーダ断面積の小さいものは 1.0 m² (水路標識) であり、その必要探知距離は 2 NM (≒3.7 km) である^[2-2]。また表 2-3 にはレーダ断面積の参考値を示すが、表 2-1 のレーダ断面積は鳥よりは大きい人がよりは小さいといった程度の非常に小さな値である^{[2-3], [2-4]}。よって提案システムでは 1 つのレーダでの探知は困難であると考え、図 2-1 のように複数の船舶用レーダを用いた再突入カプセル捕捉を想定する。船舶用レーダは水平方向に狭く、垂直方向に比較的広い指向性 (ファンビーム) をもつアンテナを水平方向に回転させる搜索レーダである (図 2-2)。各レーダは水平方向に回転して搜索範囲の水平面全域を探知する。垂直 (高度) 方向の搜索範囲は使用するアンテナの垂直面指向性ビームの形状により決まる。無線通信により各レーダをネットワーク化して搜索範囲の中に配置することも可能であるが、ミッションによっては十分なネットワーク構築が難しいことも想定されることから、各レーダは搜索範囲の外に配置することを基本とした。

表 2-2 国際海事機関（IMO）が定める船舶用レーダが満たすべき探知距離

物標の種類	レーダ断面積	必要探知距離
隆起 60 m の海岸線	50,000 m ²	20 NM
隆起 6 m の海岸線	5,000 m ²	8 NM
隆起 3 m の海岸線	2,500 m ²	6 NM
SOLAS 対象船 (>5,000 総トン)	50,000 m ²	11 NM
SOLAS 対象船 (>500 総トン)	1,800 m ²	8 NM
IMO 性能基準適合の レーダ反射器付小型船	7.5 m ²	5 NM
コーナー反射器付 航路ブイ	10 m ²	4.9 NM
一般的な航路ブイ	5 m ²	4.6 NM
レーダ反射器無し 10 m 長小型船	2.5 m ²	3.4 NM
水路標識	1.0 m ²	2.0 NM
コーナー反射器付 航路ブイ	10 m ²	0.02 NM

表 2-3 レーダ断面積の参考値

物標の種類	レーダ断面積
ジャンボジェット機	100 m ²
大型ジェット旅客機	40 m ²
中型ジェット旅客機	20 m ²
キャビンクルーザ	10 m ²
小型レジャーボート	2 m ²
人	1 m ²
鳥	0.01 m ²
昆虫	0.001 m ²

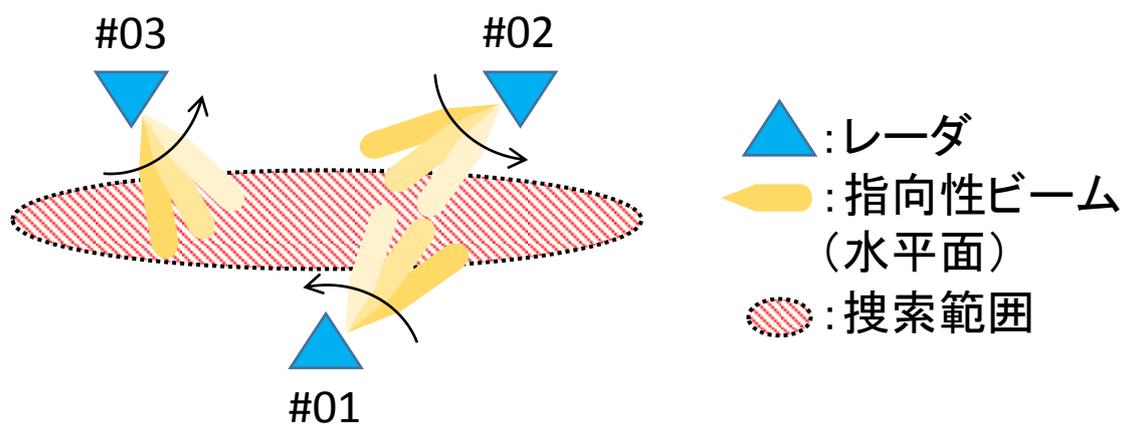


図 2-1 提案システムでの再突入カプセル捕捉イメージ (水平面)

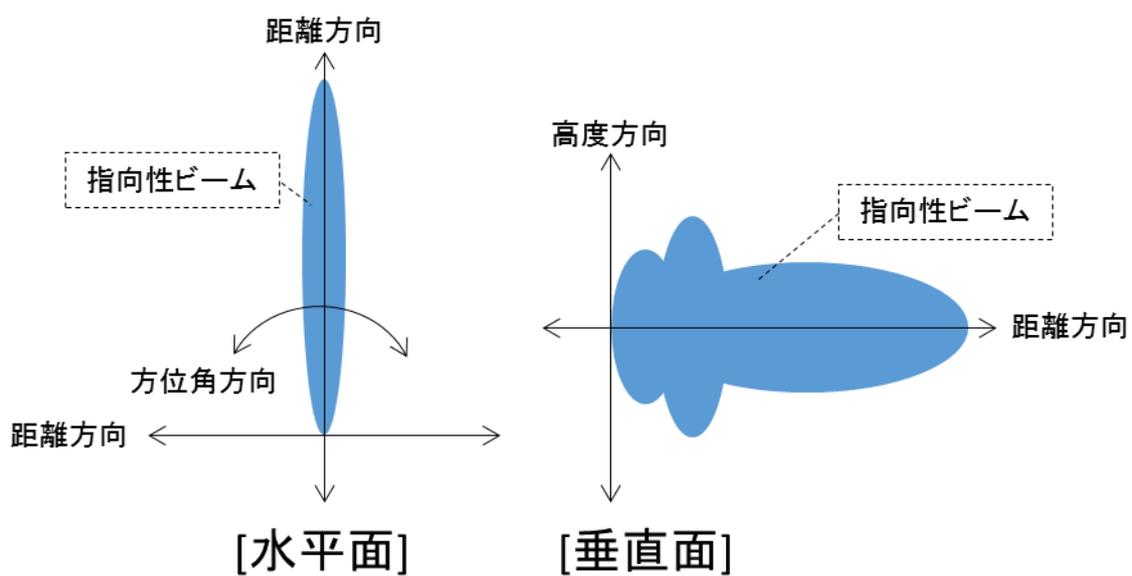


図 2-2 ファンビームパターン

2-2 レーダの要件設定

2-2-1 電気的性能の設定

船舶用レーダの主な仕様は総務省の情報通信審議会が提示する技術的条件で定義される。表 2-4 に X 帯の船舶用固体レーダの技術的条件案^[2-2]と提案システムで採用した値を示す。提案システムの仕様はこの技術的条件案を逸脱しない範囲で、最大探知距離を確保することに重きをおいて決定した。なお技術的条件が「案」となっているのは、現在はこの導入の過渡期のためである（2018 年 12 月末現在）。

表 2-4 船舶用レーダの技術的条件案と提案システムにおける仕様

項目	技術的条件案	提案システム
中心周波数	9300～9500 MHz	9390 MHz (P0N) 9410 MHz (Q0N)
送信尖頭電力	規定なし	400 W
アンテナ	規定なし	利得：30 dBi 以上 水平ビーム幅：0.8 deg 垂直ビーム幅：25 deg
電波の型式	P0N, Q0N	P0N, Q0N
パルス幅	P0N：1.2 μs 以下 Q0N：22 μs 以下	P0N：1.2 μs Q0N：22 μs
繰り返し周波数	3000 Hz 以下	3000 Hz

レーダの最大探知距離は物標からの反射波が所定の信号対雑音電力比 (Signal to Noise Ratio, SNR) を超えるか否かで判定される。固体レーダの場合、長距離探知の際には Q0N (角度変調パルスで変調信号・情報なしの意) を送信し、受信側でパルス圧縮処理を施して最大探知距離の向上を図ることが一般的ではあるが^[2-3]、パルス幅の長い Q0N 信号にてマスクされる近距離の探知のためにパルス幅の短い P0N (無変調パルスで変調信号・情報なしの意) を併用し、これらを一組として繰り返し周波数ごとに送信する (図 2-3)。P0N と Q0N では互いの反射波からの干渉を避けるために中心周波数を変えている。以降では提案システムの長距離探知性能に着目をし、Q0N を対象として議論を進める。電波型式として Q0N を用いたときの SNR に関するレーダ方程式を式(2-1)に示す^[2-3]。

$$\text{SNR} = \frac{P_t \tau G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 k T_s L_m R^4 L_s} \quad (2-1)$$

式(2-1)において分子にある変数は主に信号レベルに寄与する。送信尖頭電力 P_t は表 2-4 の技術的条件における規定はないが提案システムでは 400 W とした。これは研究開発品ではあるが、著者らが知る限り船舶用レーダ向けとして報告があったもののうち最も高い電力の値である^[2-5]。アンテナ利得 G についても技術的条件で規定はないが、高いアンテナ利得を得ることを目的として、市販されている X 帯船舶用レーダのアンテナのうち最も口径の大きなものの性能を採用した^[2-6]。パルス幅 τ に関しては技術的条件の上限値としている。

表 2-4 のうち繰り返し周波数は雑音レベルの低減度合いに関係する。同一物標への電波の照射回数を増やすことが雑音レベルの低減につながるため、繰り返し周波数は高い方が SNR を改善する面では望ましい。よってこの値にも技術的条件の上限値を採用した。このときの 2 次周回エコーは 50 km とな

るためレーダの配置決定の際に注意が必要である。

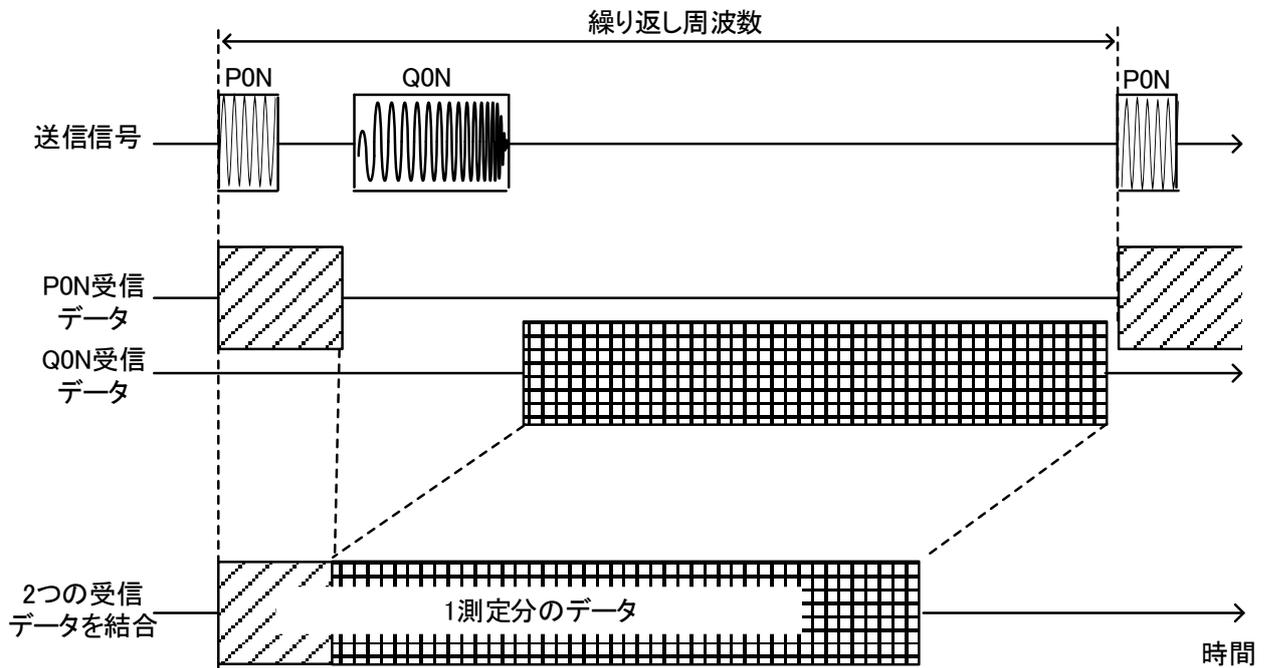


図 2-3 P0N と Q0N を併用した測定概念図

2-2-2 アンテナの回転速度

技術的条件における記載はないが、アンテナの回転速度もビジビリティファクタ V_0 の値として探知距離性能に寄与する。 V_0 は最大探知距離を定義する SNR の値であり、小さい方がより遠距離での探知が可能ということになる。 V_0 の値は所望の検出確率 P_d 、誤検出確率 P_f を定義することで式(2-2)により近似することができる [2-7], [2-8]。

$$V_0 = -5 \log_{10} M + \left(6.2 + \frac{4.54}{\sqrt{M + 0.44}} \right) \log_{10} (A + 0.12AB + 1.7B) \quad (2-2)$$

$$A = \ln \left(\frac{0.62}{P_f} \right) \quad (2-3)$$

$$B = \ln \left(\frac{P_d}{1 - P_d} \right) = \ln P_d - \ln(1 - P_d) \quad (2-4)$$

$$M = \frac{\theta f_r}{6\omega} \quad (2-5)$$

式(2-2)では M の値が大きいくほど V_0 が小さくなる。 M はサンプル数といい、同一物体にレーダ送信波が照射される回数を表す。これは式(2-5)よりアンテナの水平ビーム幅 θ 、繰り返し周波数 f_r が大きくなるほど、またアンテナの回転速度 ω が小さくなるほどに大きくなる。 θ は市販のアンテナ特性より、 f_r は最大探知距離確保のためにすでに表 2-4 で定義したことから、 ω を小さくすることが最大探知距離の

増加につながる。

一方、アンテナ回転速度 ω は検出確率とともに一定時間における移動物体の検出回数にも影響する。これは提案システムの場合、カプセルが垂直に降下した場合に最も少なくなり、その値 $N_{d\ min}$ は式(2-6)により算出される。 T_{cp} はカプセルが降下速度 V_{cp} で距離 L_{cp} を移動する際に要する時間である。

$$N_{d\ min} = \frac{\omega T_{cp}}{60} \times P_f \quad (2-6)$$

$$T_{cp} = \frac{L_{cp}}{V_{cp}} \quad (2-7)$$

検出可能な高度範囲をパラシュート開傘高度の半分である 2.5 km と仮定し、カプセルの降下速度を表 2-1 より 6 m/s、提案システムで目標とする検出確率を 0.9、誤検出確率を 10^{-5} とした場合のアンテナ回転速度 ω に対するビジビリティファクタ V_0 、最小検出回数 $N_{d\ min}$ の算出結果を表 2-5 に示す。また表 2-5 には表 2-1 よりカプセルのレーダ断面積 σ を最小条件である 0.2 m² として式(2-1)を用いて計算した最大探知距離 R_{max} も併記する。ここでは式(2-1)における L_m は文献[2-9]における検証結果を基に 2.4 dB とし、 T_s と L_s は事前のシステム設計の結果からそれぞれ 598 K、2 dB とした。

表 2-5 アンテナ回転速度に対するビジビリティファクタと検出回数および最大探知距離

ω	V_0	$N_{d\ min}$	R_{max}
24 rpm	3.1 dB	150	11.8 km
12 rpm	1.1 dB	75	13.2 km
6 rpm	-0.7 dB	37.5	14.7 km
3 rpm	-2.4 dB	18.75	16.2 km
1 rpm	-5.0 dB	6.25	18.8 km

IMO が定めるレーダ性能基準では、船舶の大きさに対して必要な最小物標検出回数が 20~40 と定められている^[2-2]。提案システムではこれを参考に 20 以上の検出を条件とし、その上で最大探知距離をできるだけ大きくとる目的でアンテナ回転速度 ω は 6 rpm とした。なお船舶用レーダのアンテナ回転速度は 24 rpm や 48 rpm が一般的である。

2-2-3 アンテナの設置仰角

提案システムではより高い高度から捜索を行うこと、および大地からの反射波を軽減することを目的としてアンテナは垂直方向に傾斜を持たせて設置することが望ましいと考えた。アンテナを垂直方向に 0~30 deg 傾けたときの垂直断面の探知距離を算出した結果を図 2-4 に示す。なお同図では等価地球半径に対して探知距離が十分短いと判断して平面大地を仮定した。図より、高度を一定として水平距離を比較した場合、アンテナ設置仰角 E_l の大きい方が水平探知距離は短くなる。一方、 E_l が小さい場合、探知可能な高度は下がる。提案システムは再突入カプセルの降着地点を推定することが目的であることから、高度よりは水平距離が優先される。しかしながら降着地点の予想楕円が、予想時の高度が下がるにつれて狭まることを考えると^[2-1]、あまりに低高度のみの追跡ではシステムの有用性が低いと言わざるを得ない。そこで水平距離の確保を第一条件とし、その上でできるだけ高い高度から追跡が可能なシス

テムが望ましいと考え、 E_f は 10 deg とした。図 2-5 には参考として E_f を 10 deg としたときの検出確率ごとの垂直断面の探知距離を示す。

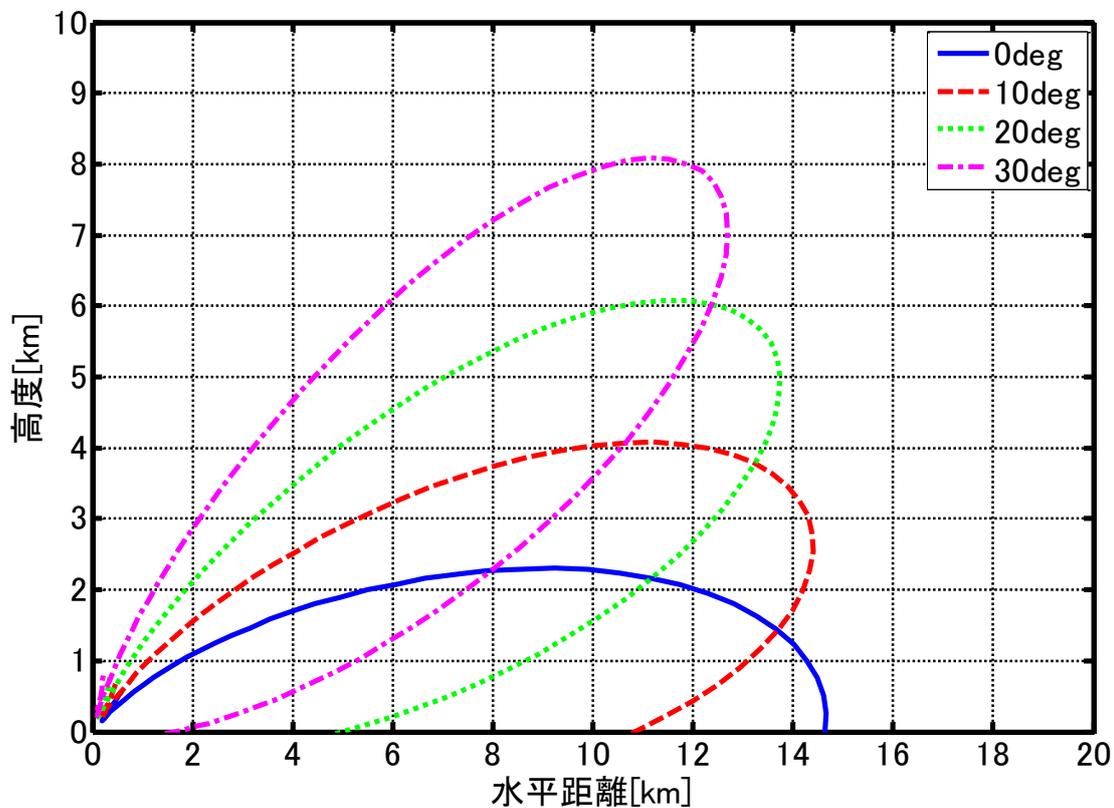


図 2-4 アンテナ設置仰角ごとの垂直断面の探知距離
 $(\sigma = 0.2 \text{ m}^2, P_d = 0.9, P_f = 10^{-5})$

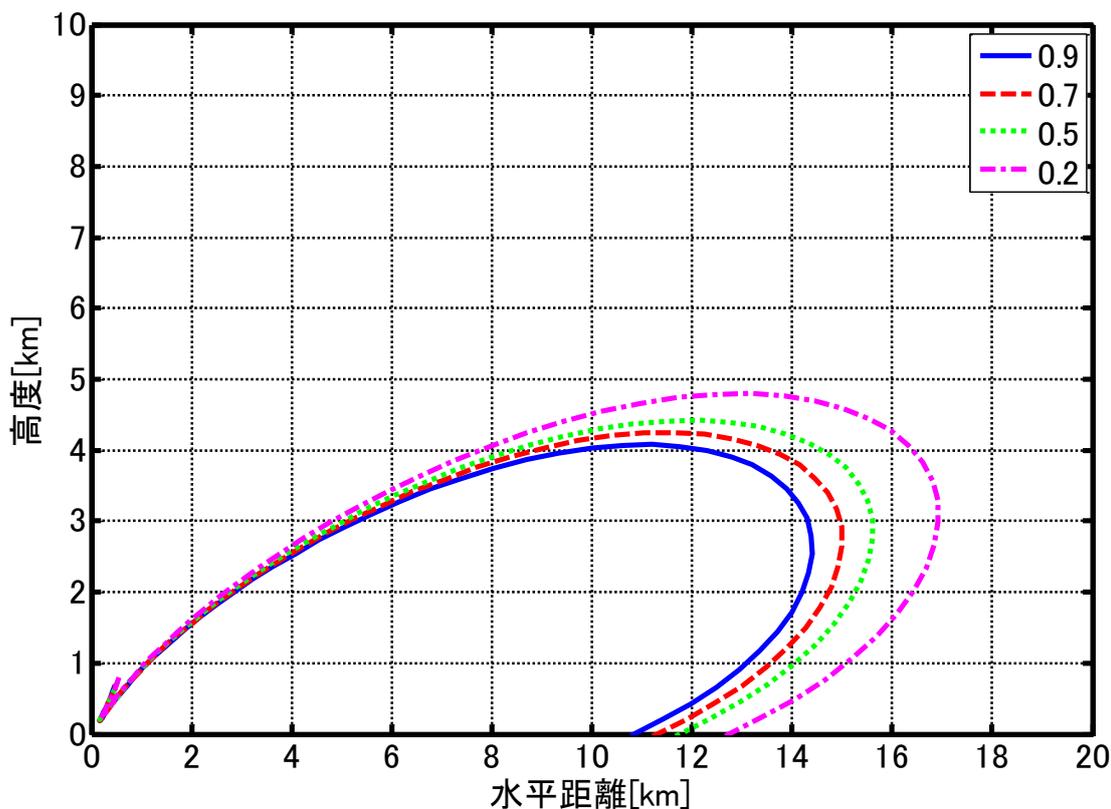


図 2-5 検出確率ごとの垂直断面の探知距離
 $(\sigma = 0.2 \text{ m}^2, E_t = 10 \text{ deg}, P_f = 10^{-5})$

2-2-4 レーダ要件の整理および基本性能

技術的条件に記載のない項目のうち重要なものとして QON 信号を送信している間の周波数掃引幅がある。ワッセナーアレンジメントでは送信先頭電力 250 W を超えるレーダは「パルス圧縮比 150 未満かつ圧縮後のパルス幅が 200 ns 以上」との規定がある。パルス圧縮比は周波数掃引幅とパルス幅の乗算により求められ、圧縮後のパルス幅は周波数掃引幅の逆数となる。提案システムでは表 2-4 においてパルス幅を 22 μs と定義していることから、パルス圧縮比の規定に準拠した場合の周波数掃引幅は 6.8 MHz 以下、圧縮後のパルス幅規定に準拠した場合は 5 MHz 以下となる。よって提案システムでは周波数掃引幅を 5 MHz とする。

前項までで定義したレーダの要件を表 2-6 にまとめる。また図 2-6 には表 2-6 の要件を用いて式(2-1)により計算した距離に対する SNR を示す。

表 2-6 提案システムにおけるレーダの要件

項目	技術的条件案	提案システム
中心周波数	9300~9500 MHz	9390 MHz (P0N) 9410 MHz (Q0N)
送信尖頭電力	規定なし	400 W
アンテナ	規定なし	利得：30 dBi 以上 水平ビーム幅：0.8 deg 垂直ビーム幅：25 deg
電波の型式	P0N, Q0N	P0N, Q0N
パルス幅	P0N：1.2 μ s 以下 Q0N：22 μ s 以下	P0N：1.2 μ s Q0N：22 μ s
繰り返し周波数	3000 Hz 以下	3000 Hz
アンテナ回転速度	—	6 rpm
検出確率	—	0.9
誤検出確率	—	10^{-5}
物標検出回数	—	20 以上
アンテナ設置角度	—	10 deg
周波数掃引幅	—	5 MHz

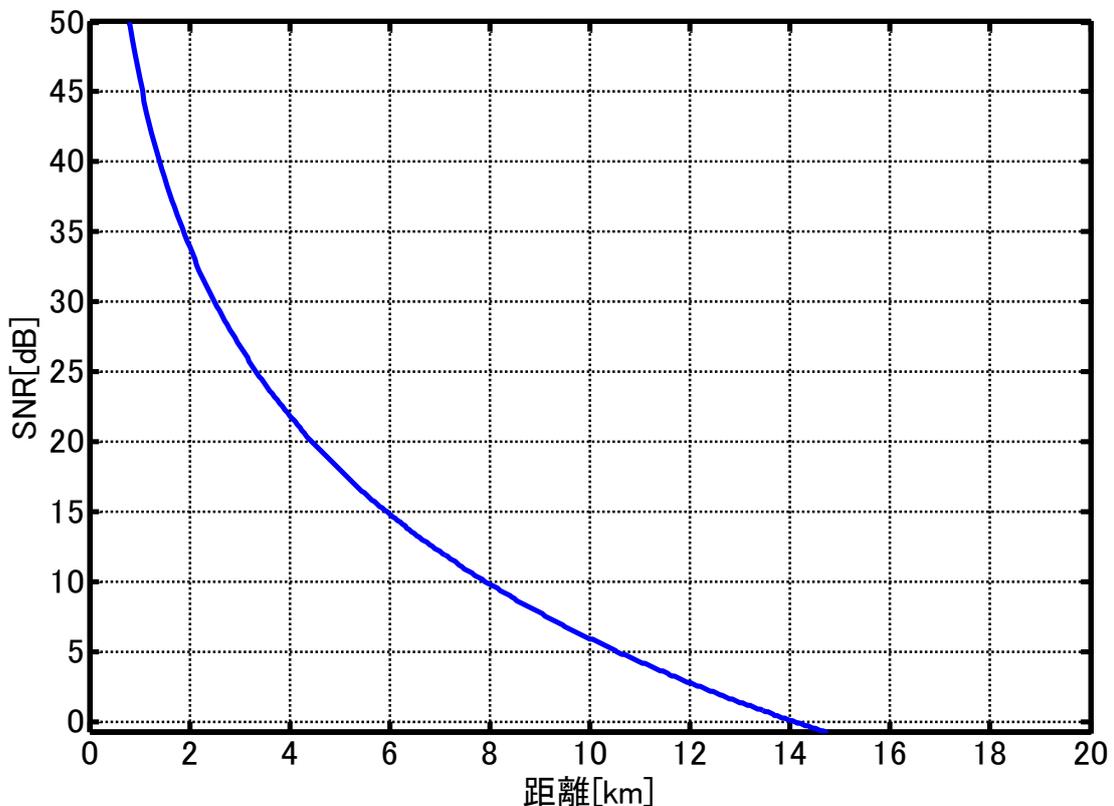


図 2-6 距離に対する SNR の試算結果 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$)

図 2-5 の垂直断面の探知距離を持ったレーダを水平方向に回転させた場合の水平面探知範囲を、高度ごとに算出した (図 2-7). 図の X 軸距離が図 2-5 における水平距離に相当し、搜索範囲の外にレーダを配置することを想定したことから X 軸距離のマイナス方向の距離は記載を省略した. 検出確率を示す線は確率ごとにそれぞれ 2 本ずつ記載されており、ともに高度が下がるにつれて小さくなる. この 2 つの円に挟まれた範囲が同一検出確率で探知が可能な範囲となる.

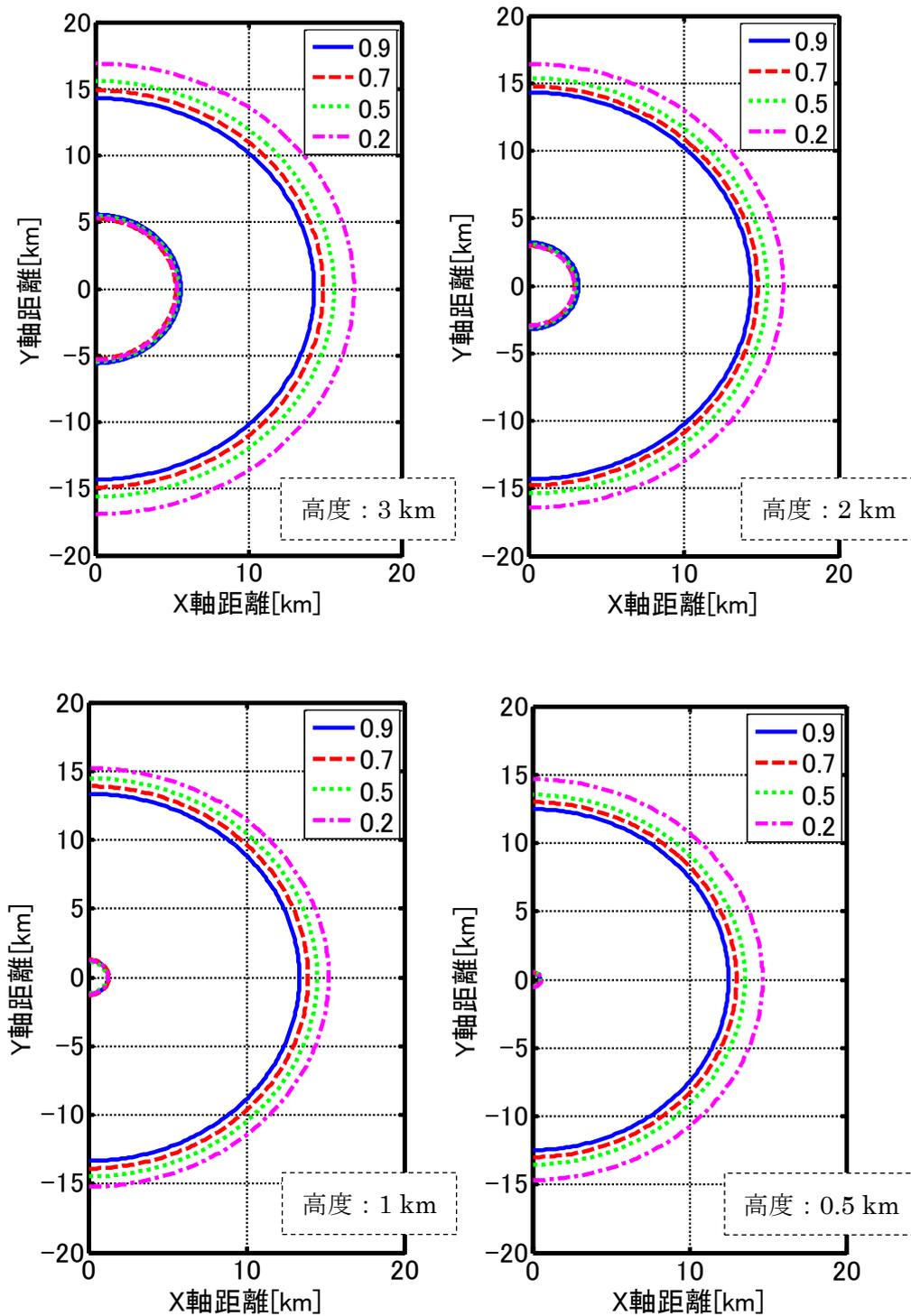


図 2-7 高度ごとの水平面探知範囲 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $E_l = 10 \text{ deg}$)

2-3 提案システムにおけるレーダ配置のルール化

再突入カプセルの予想降着地点は再突入軌道や当日の風予報データ、パラシュート開傘時の高度などから決定され、ミッションが異なるたびに提案システムが対応すべき搜索範囲は変わる。このためさまざまな搜索範囲に対応するためにはレーダの配置にルール化が必要であると考えた。図 2-8 には、図 2-7 の結果から検出確率を 0.9 としたときの、レーダ 1 局での高度ごとの水平面探知範囲を示す。また表 2-7 にはそれぞれの高度における探知範囲の外円と内円の半径を示した。

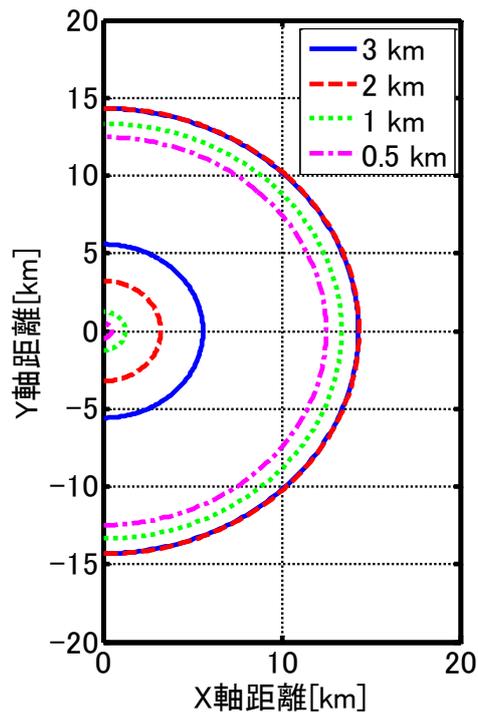


図 2-8 高度ごとの水平面探知範囲 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)

表 2-7 カプセル高度に対する探知外円と探知内円の半径

カプセル高度	探知外円半径	探知内円半径
3 km	14.3 km	5.6 km
2 km	14.2 km	2.9 km
1 km	13.4 km	1.2 km
0.5 km	12.5 km	0.6 km

提案システムでは搜索範囲の外にレーダを配置することを基本とする。1つのレーダで高度 3 km から 0.5 km でカプセル捕捉を行う場合、その搜索範囲は高度 3 km の内円と高度 0.5 km の外円に挟まれた範囲となる。この場合、楕円の短軸距離の最大はそれら半径の差分となり、6.9 km (12.5 km - 5.6 km) となる。この短軸の中心と高度 0.5 km の外円が接する距離を長軸として定義すると、高度 0.5 km においてわずかに検出確率が低下する領域は生じるが、最も広範な範囲での探知が可能となる (図 2-9)。このときの長軸距離は 17.2 km となり、レーダ 1 局で探知可能な搜索範囲は 17.2 km × 6.9 km

の楕円となる。

カプセルの捕捉においては楕円の中心が降着確度の高い重要な搜索箇所となるため、搜索範囲の拡大に対しては複数のレーダを用いて楕円中心を含む短軸距離を如何に探知するかが重要となる。よってレーダの配置は搜索範囲の短軸距離をその決定基準とした。以下に本研究において定義した3種の配置ルールについて示す。

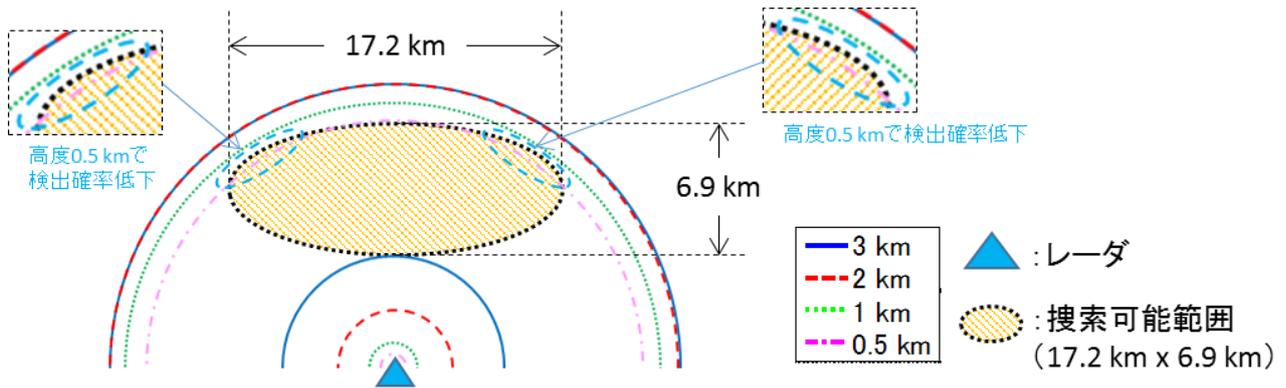


図 2-9 レーダ 1 局での搜索可能範囲 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)

【配置ルール 1 : 短軸距離が 6.9 km 以下の場合】

長軸の増加に対し、短軸方向に 18.1 km 離反したレーダを、長軸方向に 12.5 km 間隔で配置する。この場合、短軸距離は 1 局のレーダで確保できるので、高度 0.5 km の探知外円半径 (12.5 km) ごとにレーダを配置すれば広範囲の探知範囲を得ることができる。18.1 km は 2 局のレーダを相対させた場合に高度 3 km の内円と高度 0.5 km の外円が接する距離である (図 2-11)。

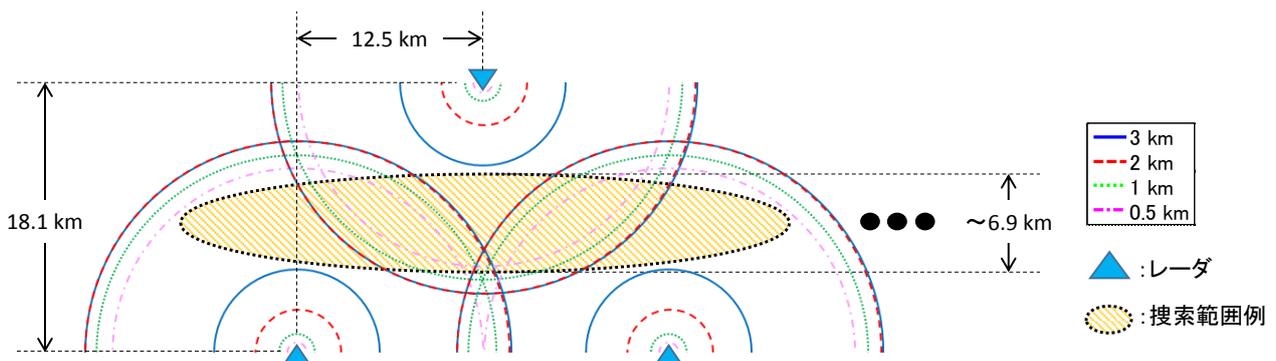


図 2-10 短軸距離が 6.9 km 以下の場合の配置ルール

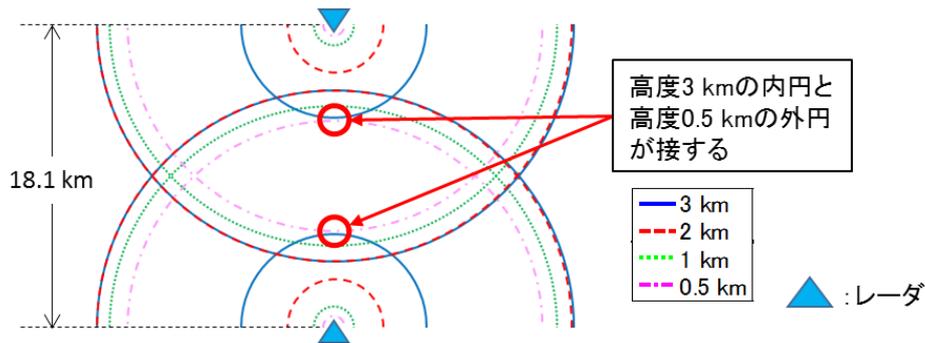


図 2-11 配置ルール 1 の補足説明

【配置ルール 2 : 短軸距離が 6.9 km 以上 18.1 km の場合】

短軸方向に 18.1 km 離反させたレーダ 2 局を一組とし、長軸の増加に対して 17.2 km 間隔で配置する。17.2 km は相対した 2 局のレーダの高度 0.5 km における探知外円の交点間の距離である。この場合、短軸距離が長くなるにつれてレーダ近傍で搜索不可能な範囲を生じるが、楕円中心での探知を優先して許容した。

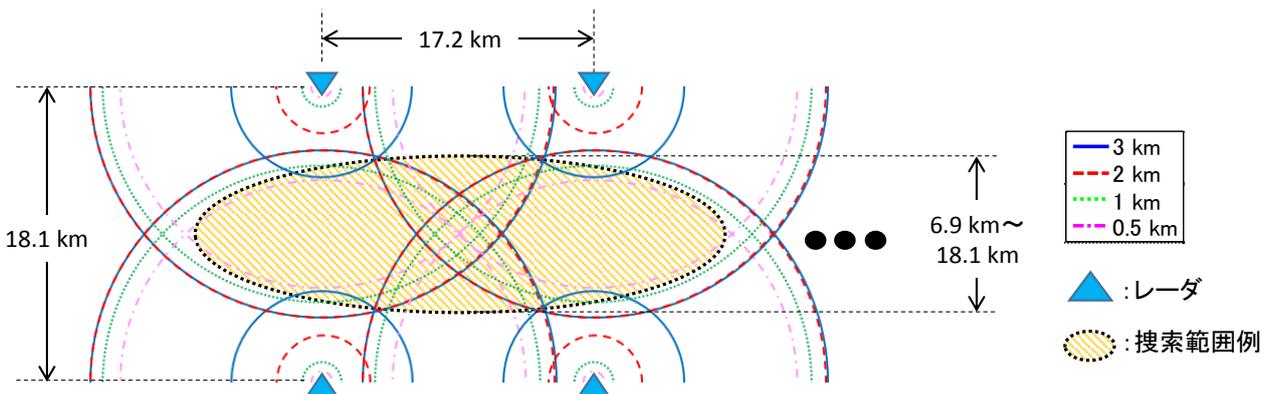


図 2-12 短軸距離が 6.9 km 以上 18.1 km 以下の場合の配置ルール

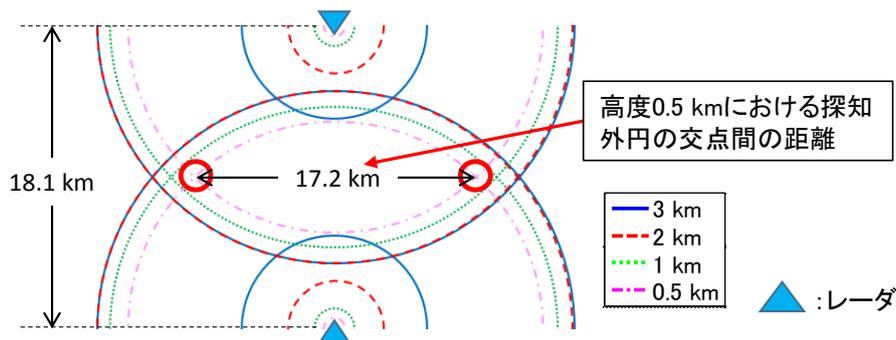


図 2-13 配置ルール 2 の補足説明

【配置ルール 3 : 短軸距離が 18.1 km 以上の場合】

短軸距離と同じ距離を離反させたレーダ 2 局を一組とし、長軸の増加に対して配置する。長軸方向の配置間隔は短軸距離により異なり、相対した一組のレーダの高度 0.5 km の探知外円が接する距離とする。表 2-8 に短軸距離に対する長軸方向の配置間隔を示す。なお短軸距離が大きくなり、相対した一

組のレーダの高度 0.5 km の探知外円が接しない場合， 搜索範囲外のレーダ配置での高度 0.5 km までの搜索は不可能となるため， 低高度での探知を行わないか， もしくは検出回数を犠牲にしてアンテナ回転速度を低下させ， 探知距離性能を向上させることなどが必要となる。

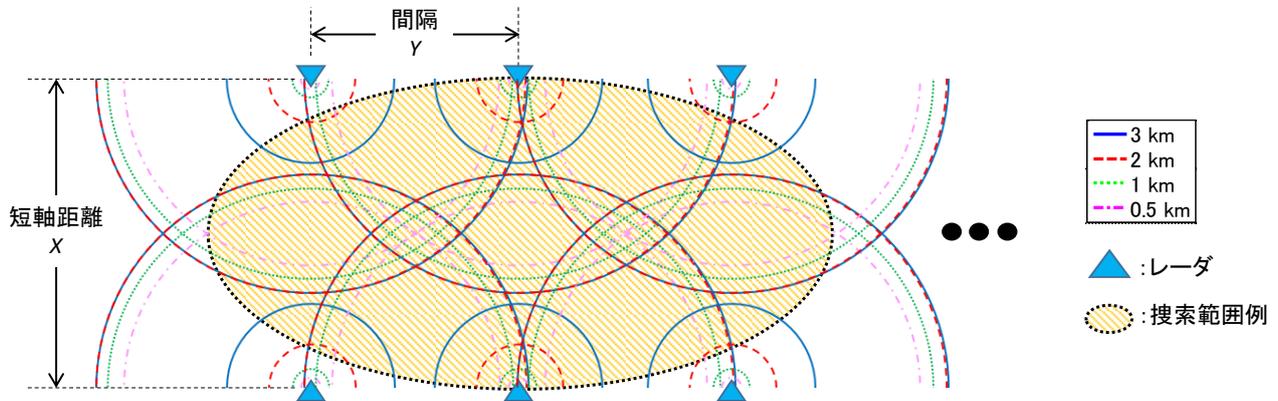


図 2-14 短軸距離が 18.1 km 以上の場合の配置ルール

表 2-8 短軸距離に対する長軸方向のレーダ配置間隔

短軸距離 X	長軸間隔 Y
18.1 km	17.2 km
19 km	16.3 km
20 km	15.0 km
21 km	13.6 km
22 km	11.9 km

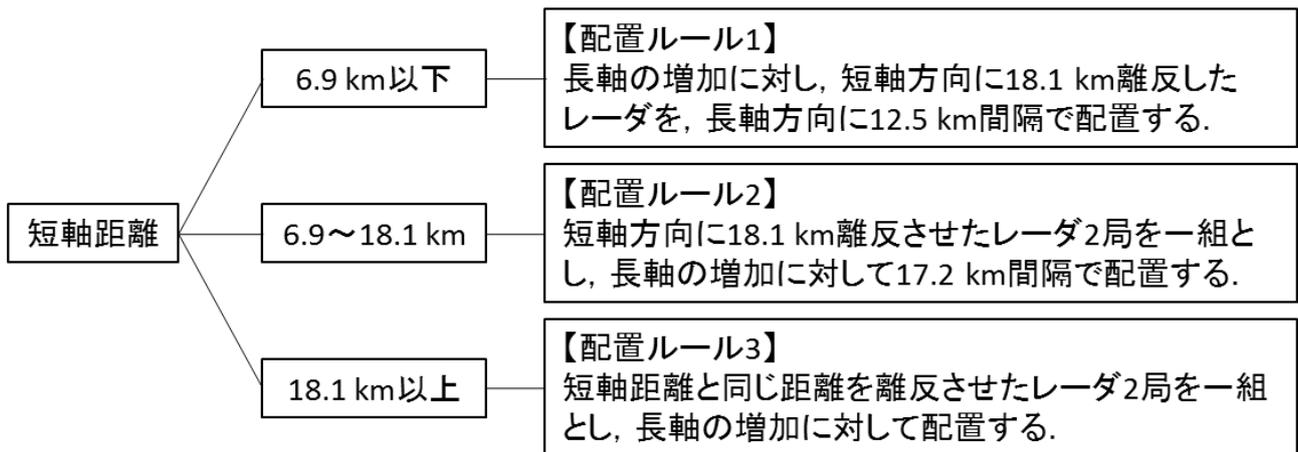


図 2-15 提案システムにおけるレーダ配置ルール

2-4 提案システムにおける探知距離性能の試算

前節で定義したレーダの配置ルールに従い、表 1-2 に示した各探査ミッションの搜索範囲実績における搜索性能を確認する。カプセルのレーダ断面積には表 2-1 における下限値を用いる。

まずははやぶさの条件では短軸距離が 3 km であるため配置ルール 1 に当たる（長軸は 40 km）。レーダ配置と各高度における探知範囲を図 2-16 に示す。図には高度 3 km から 0.5 km の全域で探知可能な範囲（高度 3 km の内円と高度 0.5 km の外円に囲まれた範囲）も併せて示した。はやぶさの実績に対しては 3 局のレーダを配置することにより高度 3 km 以下で搜索範囲のすべてが探知可能な結果となった。STARDUST においては短軸距離が 8.2 km であるため配置ルール 2 となる（長軸は 38.1 km）。レーダ配置と各高度における探知範囲を図 2-17 に示す。STARDUST の実績に対しては、高度が低い場合に長軸の両端において検出確率 0.9 での探知が不可能となる領域が生じる。GENESIS における短軸距離は 21.2 km となるため配置ルール 3 となる（長軸は 41.9 km）。レーダ配置と各高度における探知範囲を図 2-17 に示す。STARDUST の実績に対しては、高度が高い場合において各レーダ近傍で検出確率 0.9 での探知が不可能となる領域が生じる。

表 2-9 には各探査ミッションの搜索範囲実績に対するカバー率を示す。このカバー率は、搜索範囲の面積と提案システムで探知可能な範囲の面積の割合で定義した。提案システムによりいずれの搜索範囲においても 90 % を超える探知範囲が得られることから提案システムは再突入カプセル捕捉に対して有用であり、そのシステム要件およびレーダの配置ルールも適正であると判断した。

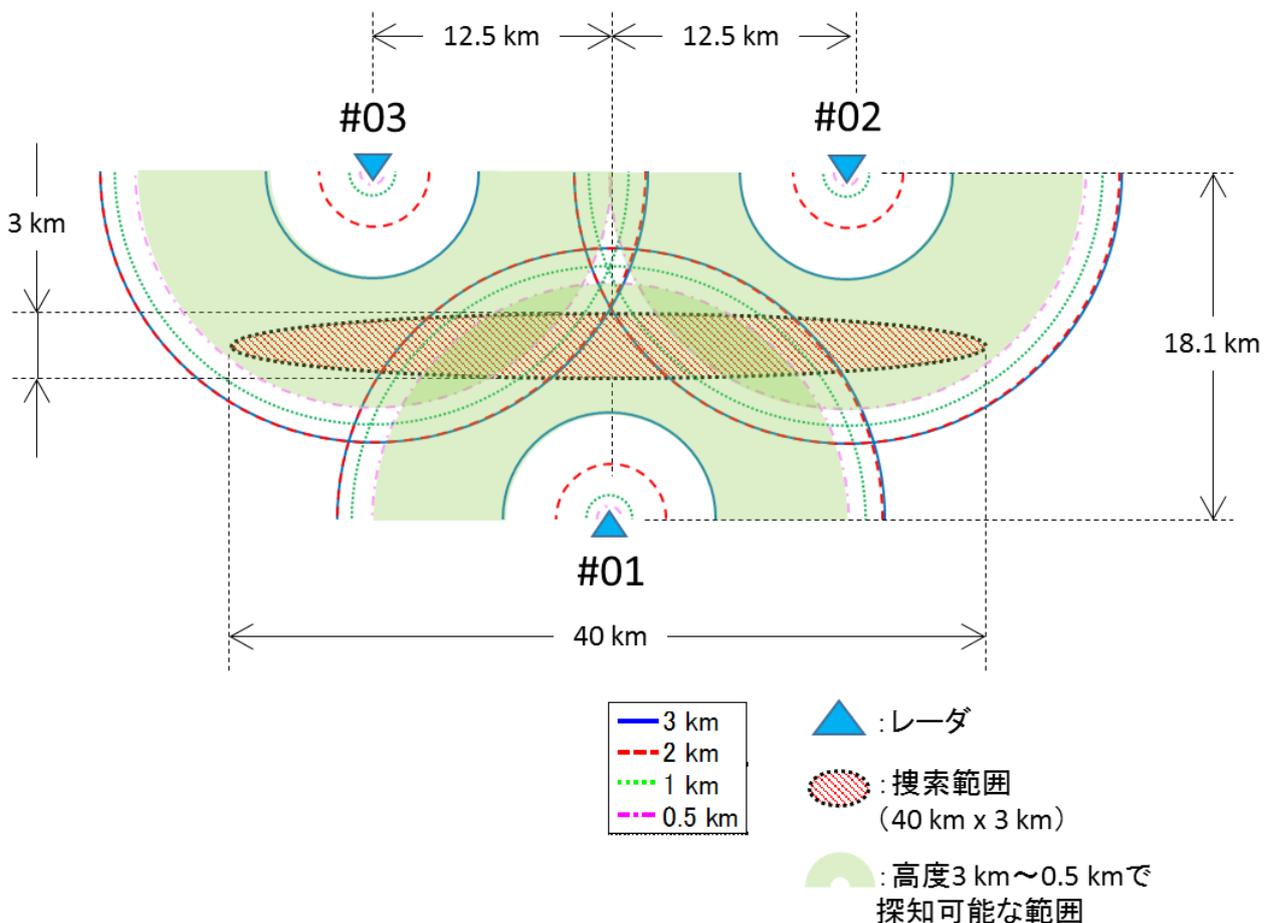


図 2-16 はやぶさ実績に対する搜索範囲性能 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)

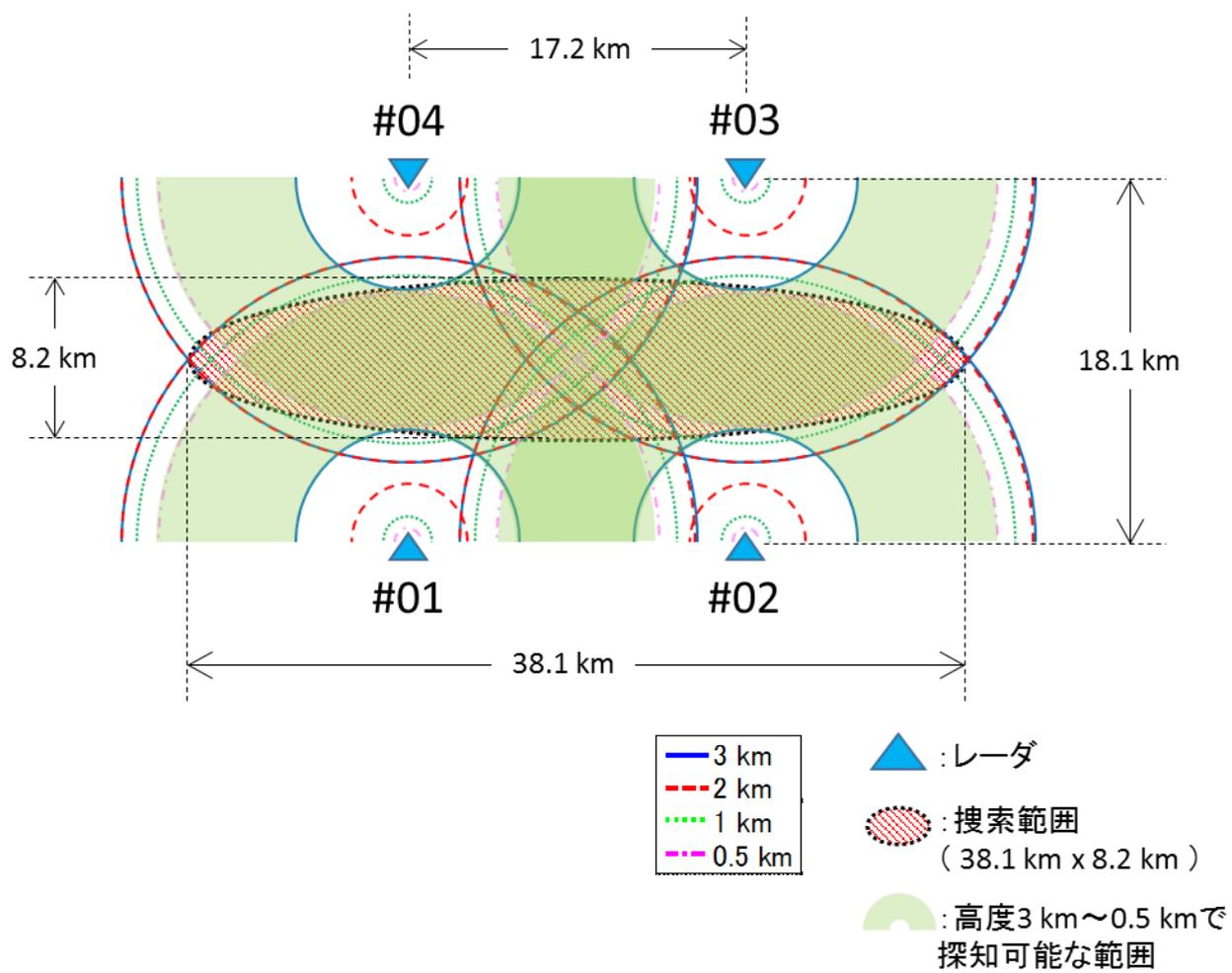


図 2-17 STARDUST 実績に対する搜索範囲性能 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)

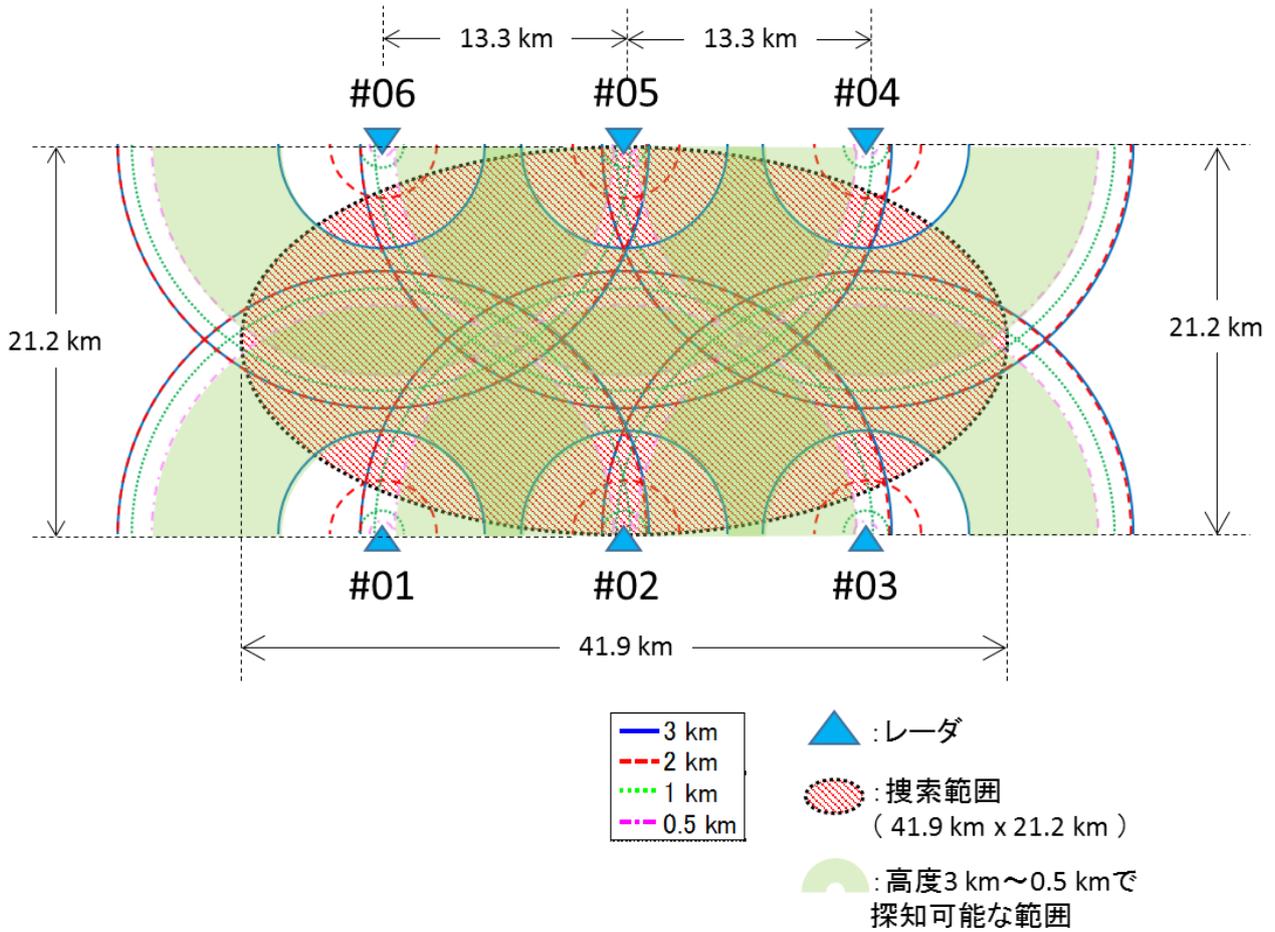


図 2-18 GENESIS 実績に対する搜索範囲性能 ($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_l = 10 \text{ deg}$)

表 2-9 各探査ミッションの実績に対する搜索範囲のカバー率

高度	はやぶさ	STARDUST	GENESIS
3 km	100 %	100 %	96.8 %
2 km	100 %	100 %	100 %
1 km	100 %	99.8 %	100 %
0.5km	100 %	98.1 %	99.6 %

2-5 文献

- [2-1] 水野貴秀, 川原康介, 山田和彦: ビーコンを使った再突入カプセルの搜索システムとその運用, 日本航空宇宙学会誌 60 卷 7 号, 2012, pp. 250-256.
- [2-2] 情報通信審議会 情報通信技術分科会: 航空・海上無線通信委員会報告(案)「船舶用固体素子レーダーの技術的条件」, 2016 年 7 月.
- [2-3] 伊藤信一: レーダシステムの基礎理論, コロナ社, 2015.
- [2-4] Radar Cross Section (RCS). Global Security.
<https://www.globalsecurity.org/military/world/stealth-aircraft-rcs.htm>, (参照 2019 年 4 月)
- [2-5] 須藤正則, 菅原博樹, 沢柳雅哉, 山縣純次: X 帯船舶レーダー用 400WGaN 固体化増幅器, 日本無線技報 No.55, 2008, pp. 25-28.
- [2-6] MDC-7900 シリーズカタログ. 株式会社光電製作所.
<https://www.koden-electronics.co.jp/jp/marine/mdc/mdc-7920>, (参照 2018 年 7 月)
- [2-7] Alberhseim W.D: A Closed-Form Approximation to Robertson's Detection Characteristics, Proc. IEEE, 1981, pp. 839.
- [2-8] 関根松夫: レーダ信号処理技術, 電子情報通信学会, 1991.
- [2-9] J. E. Cilliers, J. C. Smit: Pulsompression Sidelobe Reduction by Minimization of Lp-Norms, IEEE Trans. AERO, Vol. 43, No. 3, pp. 1238-1247.

第3章 パルス動作型高出力 GaN 増幅器の試作

3-1 パルス動作型高出力 GaN 増幅器

提案システムでは船舶用レーダの可搬性を保ったまま、X 帯で 400 W の送信尖頭電力を実現する必要がある。X 帯で 100 W を超える送信尖頭電力の固体レーダは軍用などの大型な装置では珍しくないが、船舶用などの小型なものでは研究開発品^[3-1]に留まり、一般に入手することはできない（2018 年 7 月末現在）。船舶用レーダは軍用などと比べて小型でかつ安価であるにも関わらず、使用環境は温度・湿度ともに過酷なものとなる。高出力増幅器に対して十分な放熱機構を用意することが、サイズ・価格の面で困難であることが高出力型船舶用固体レーダの普及の妨げになっていると考える。

本研究では既存の船舶用レーダに収納可能なサイズで、かつ放熱機構が不要もしくは簡易な放熱機構で高出力が可能な増幅器の開発が重要であると考えた。そのため増幅用の半導体デバイスには GaN を用いることとした。GaN は熱伝導率、バンドギャップ、耐圧等に優れ、GaAs (Gallium Arsenide) と同等のサイズでも大きな電力を扱えることから小型化に寄与する。

また増幅素子としては内部整合がなされた MMIC が市販されているが、本研究ではベアチップを用い、整合回路を自ら設計することとした。MMIC は汎用性を重視したものであるため、システムにとって必要以上に広帯域であり、サイズの自由度がなく、比較的高価なものとなっている。システムに必要最小限な仕様で設計を行うことにより、小型化に加え、低コスト化にも寄与できると考えた。

高出力 GaN 増幅器の設計目標としては、1 つのベアチップを用いて 50 W 以上の出力を得ることとした。提案システムでは 400 W の出力が必要になるが、市販されているベアチップの最大出力は 6 W から 100 W 程度である^{[3-2][3-3]}。よって本研究では 70 W 出力級の GaN HEMT (CGHV1J070D, Wolfspeed 社) を用いて 50 W を超える出力を果たし、高出力化に対してはこの増幅器を 2 つ以上合成することにより果たそうと考えた。複数増幅器を合成する場合に重要となってくるのは合成回路の低挿入損失化と、個別の増幅器の特性再現性である。このうち前者は文献[3-4][3-5]などのように導波管構造の合成器による低挿入損失化の報告が多数あるが、後者については整合回路の設計によるところが大きく、複数台製作時に個々の増幅器の振幅・位相特性に差異が生じた場合、期待したような高出力化の効果が得られないことがある。よって合成の基本単位となるベアチップ 1 つで実現する増幅器においては、複数製作時の特性再現性が高出力化に向けた重要な要素となる。

一方提案システムでは固体パルスレーダの採用を想定しており、この種のレーダでは探知距離性能の確保や距離分解能の維持・向上の観点からパルス圧縮処理が行われる。この処理において、より高精度な探知のためには、パルス信号の時間波形が重要となる。パルス信号の時間波形に関しては、いくつかの報告で熱特性と関連させた解析・モデル化が行われているが^{[3-6]-[3-8]}、増幅器の使用条件の違いなどに着目をした、より実用的な報告は少ない。そこで本研究では試作した高出力 GaN 増幅器を用い、出力レベルやパルス幅などの信号諸元や周囲温度の変化に対する挙動の調査を行った。また増幅器前後の時間波形の比較も行い、パルス波形歪の傾向、およびそのパルス圧縮結果への影響を調査した。このパルス波形歪について使用条件による特性変動を考慮する場合、増幅器出力にフィードバック回路を設けて歪補償を行うことが一般的である^[3-9]。しかしこれは回路の追加を伴うため小型化の観点では望ましくない。そこで本研究ではフィードバック回路を使用せずにこの影響を低減する手法の提案も行う。

表 3-1 代表的な化合物半導体の物性

	GaAs	4H-SiC	GaN
バンドギャップ [eV]	1.4	3.3	3.4
比誘電率	12.8	10.0	9.5
臨海電界強度[MV/cm]	0.4	3.0	3.3
電子飽和速度[10 ⁷ cm/s]	2.0	2.0	2.5
熱伝導率[W/cm・K]	0.5	4.9	2.1

表 3-2 ベアチップと MMIC を用いた増幅器の比較

ベアチップ	比較項目	MMIC
なし	整合回路	内蔵
○	コスト	×
×	設計容易性	○
○	設計自由度	×

3-2 高出力 GaN 増幅器の試作

3-2-1 回路構成と設計手法

基本となるペアチップ 1 つで構成する 50 W 出力級 GaN 増幅器は、小型化のために極力シンプルな回路構成を目指した。増幅器の整合回路では、より広い周波数範囲での性能実現のためにプリマッチしたペアチップを複数並列に動作をさせる手法や、回路素子を複数直列に挿入して段階的に整合をとる手法などがある^{[3-10], [3-11]}。しかし本研究における増幅器は船舶用レーダ専用のため、狭周波数帯域での設計が適用できる。そのため整合回路は入出力各 1 つのインピーダンス変成回路のみとして小型化を図った。当研究室の過去実績^[3-10]との比較を図 3-1 に示す。過去実績では入力側で 3 つ、出力側で 2 つの回路素子による整合を行っているが、それを低減する試みである。動作級としては利得の確保を目的として A 級動作を採用した。これによりパルス信号を用いた通信機能など、線形性を利用した新たな機能付加も期待できる。

バイアス回路に対してはゲート電圧の切り替えにより増幅器の ON/OFF を行うゲートスイッチング方式を採用した。バイアス電圧のスイッチング方式としては他にドレイン電圧を操作するドレインスイッチング方式があるが、GaN のドレイン電圧は数十 V となるためスイッチングには高耐圧の MOS FET が必要となり小型化の面で望ましくない。ゲートスイッチング方式では増幅器の FET 自体がスイッチ素子として機能するため回路規模を小さくできる。しかしゲート電圧を高速に切り替えるため、回路の安定動作に影響の大きいゲートバイアス回路を最小限の容量のバイパスコンデンサで構成する必要がある。

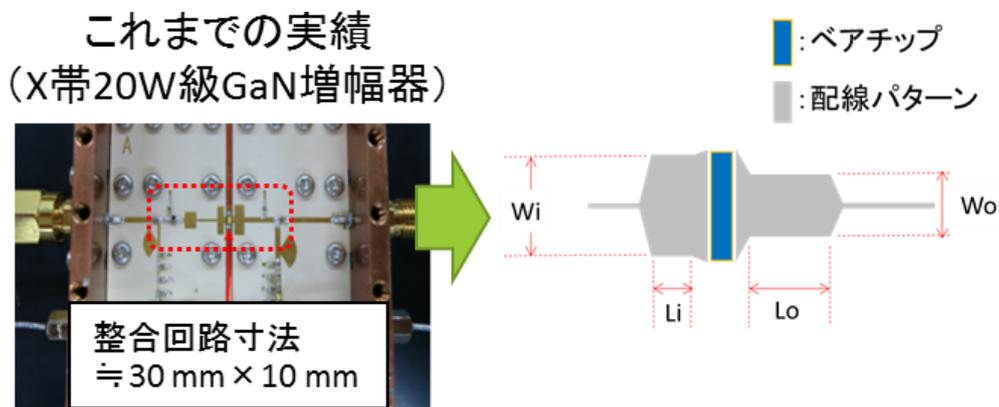


図 3-1 50 W 出力級 GaN 増幅器の整合回路構成

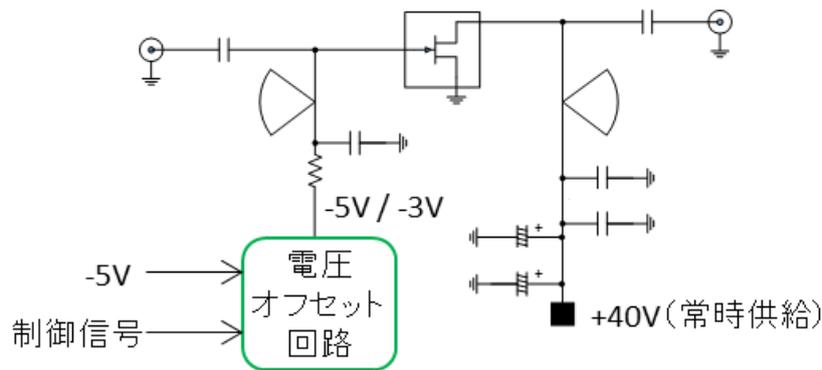


図 3-2 ゲートスイッチング方式におけるバイアス回路構成

設計においては整合回路とゲート・ドレインのバイアス回路を含むその他周辺回路で、基板材料は同じであるが、基板厚を変えた。基板材料はともに RO4350B (Rogers 社) であり、基板厚は整合回路で 0.101 mm, 周辺回路で 0.254 mm である。これは整合回路に対してはベアチップの有するインピーダンスに対してインピーダンス変成器が大きくなり過ぎないようにしたためであり、周辺回路に対しては部品実装などの製作性を考慮して 50Ω ライン幅を細くし過ぎないためである。

設計手法を図 3-3 に示す。「基本設計手法」と記載された箇所の手順は当研究室で行っている基本的な設計手法であり、整合回路とバイアス回路をそれぞれに求められる性能を達するように個別に設計し、最終的にそれらを組み合わせることで、小信号特性や大信号特性を確認し、その結果が所望の特性に達しない場合には再び個別回路の設計に回帰して原因調査等を行うといった手法である。これに対し今回の設計では整合回路の設計をより細分化した。手順を以下に示す^[3-11]。

- A) ベアチップの動作点を決定する。
- B) ベアチップと、ベアチップと基板を接続するためのワイヤ、およびワイヤが接続される基板側のボンディングパッドのみで小信号シミュレーションを行い、このときのインピーダンスを観測して、その虚部がゼロになるようにボンディングパッドの形状を調整する。
- C) A の状態で大信号にてロードプルシミュレーションを実施し、最適な入出力インピーダンス (Z_i , Z_o) を求める。
- D) Z_i および Z_o の実部を 50Ω に変換するインピーダンス変成器のパターン幅 (W_i , W_o) を計算により求める。
- E) 入力側回路を幅 W_i のパターンと 50Ω ラインにより形成する。入力側の信号源インピーダンスを 50Ω, 出力側信号源のインピーダンスを Z_i の複素共役 (Z_i^*) として、この回路のみで小信号シミュレーションを行って、整合がとれるように幅 W_i のパターンの長さを決定する。出力側についても同様に幅 W_o のパターンの長さを決定する。
- F) E の入出力回路とベアチップを接続して小信号および大信号シミュレーションを実施する。所望の特性に満たない場合には再び個別の整合回路設計に回帰して原因調査を行う。

バイアス回路設計ではゲート・ドレインの回路をそれぞれ個別に設計した。この設計では $\lambda/4$ ラインとラジアルスタブを用いて、RF 信号ラインとの接続部から見たインピーダンスが所望の周波数範囲にて高いインピーダンスになるようにした。ゲート、ドレインバイアス回路の設計結果を図 3-4 に、

整合回路を含めた増幅器全体の回路図とパターン図，およびシミュレーション結果をそれぞれ図 3-5 から図 3-7 に示す．整合回路では回路素子の低減により寸法を 9 mm×5 mm とすることができた．

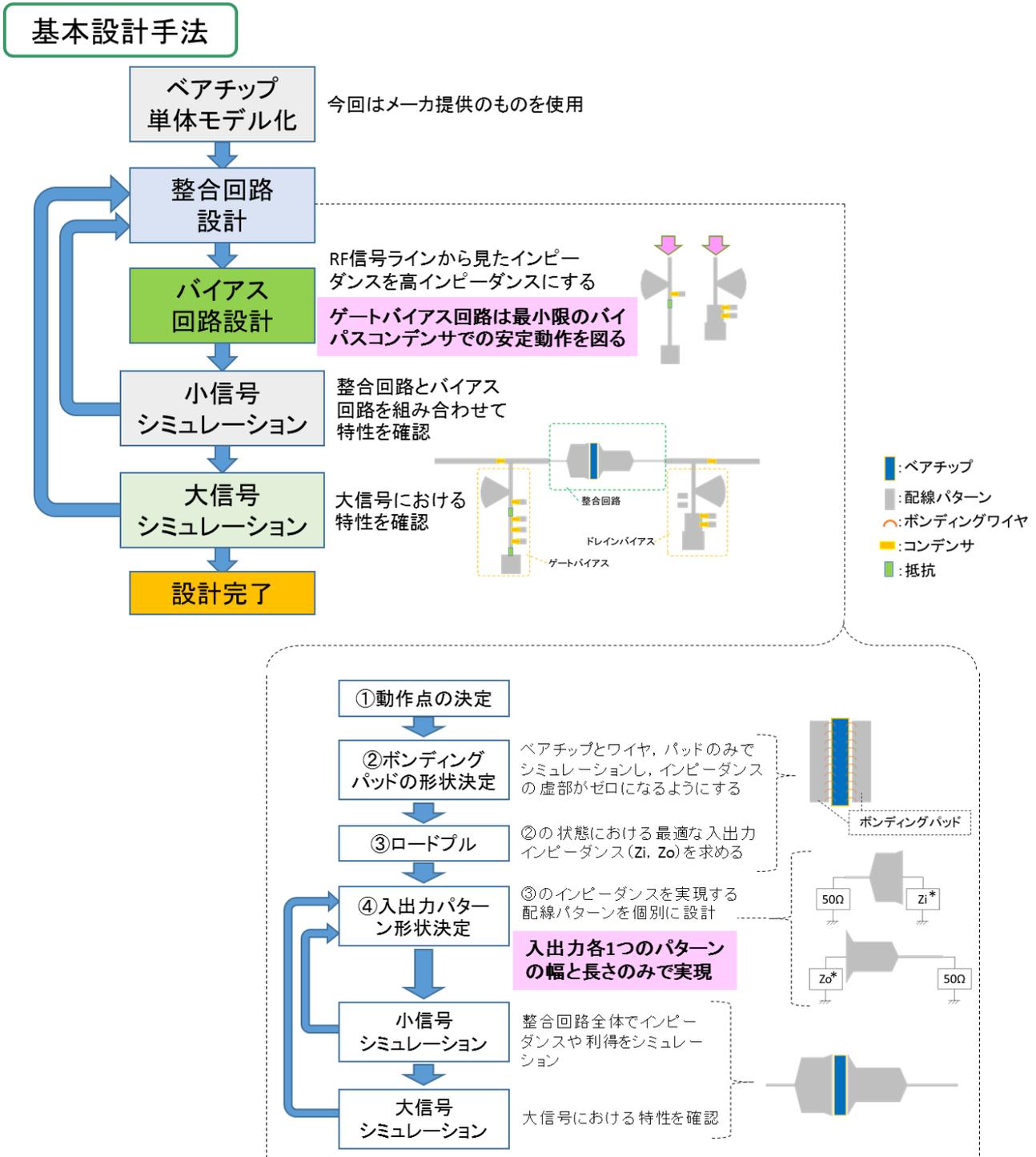


図 3-3 50 W 出力級 GaN 増幅器の設計手法

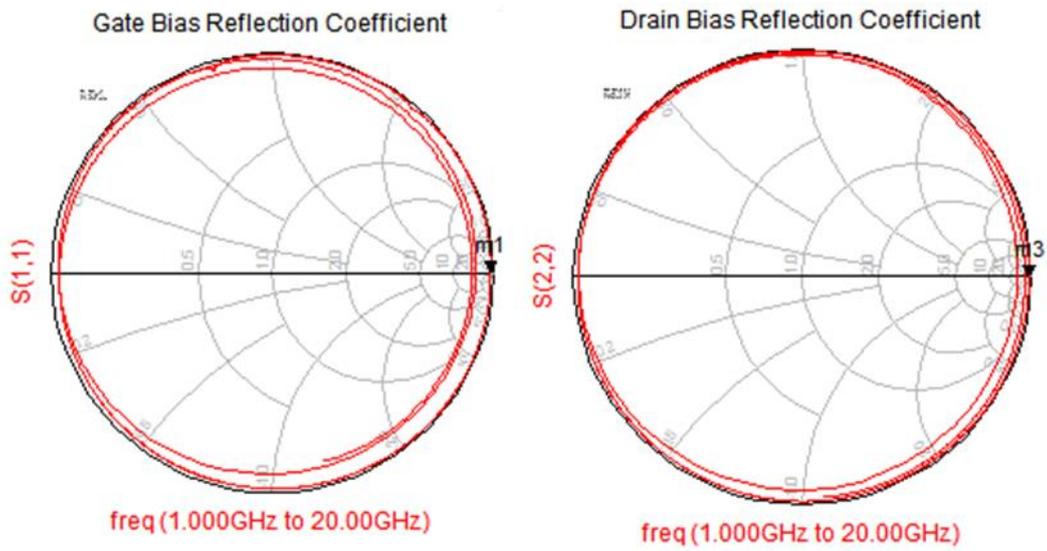


図 3-4 バイアス回路の設計結果

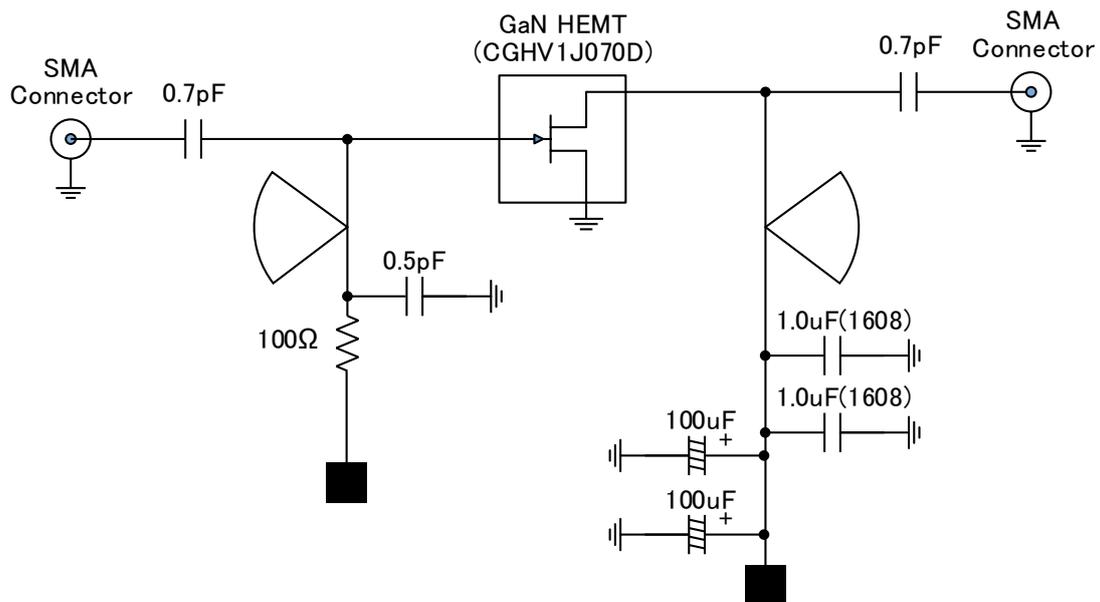


図 3-5 50 W 出力級 GaN 増幅器の設計結果 (回路図)

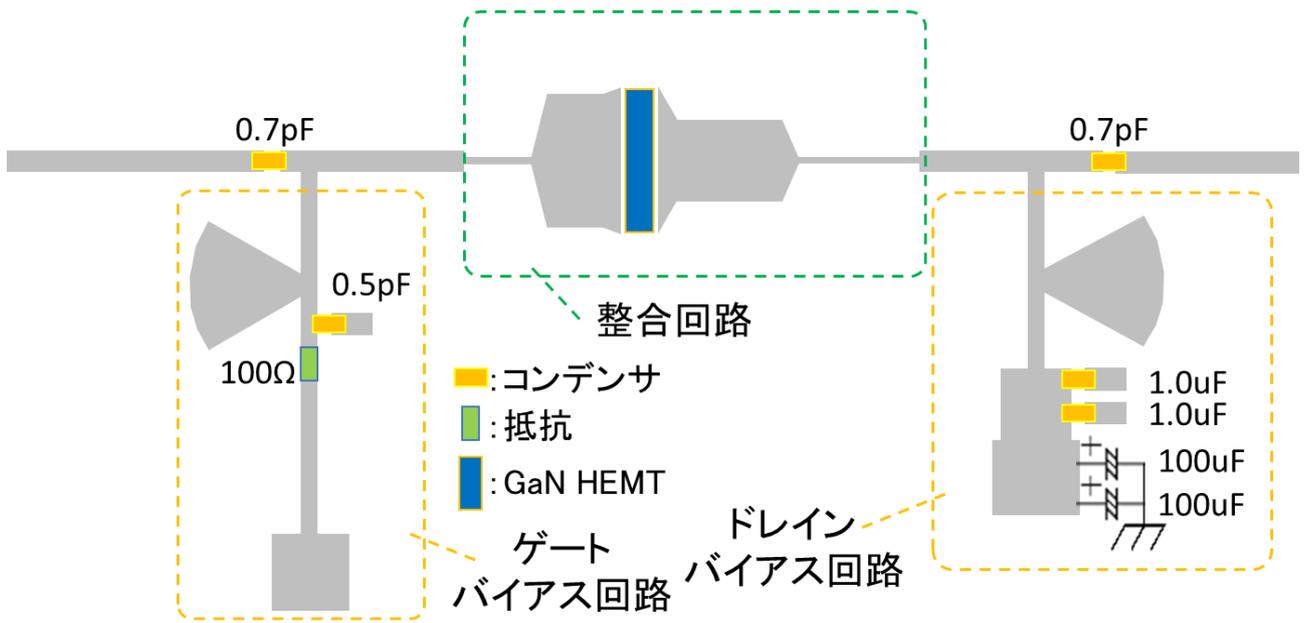


図 3-6 50 W 出力級 GaN 増幅器の設計結果 (パターン図)

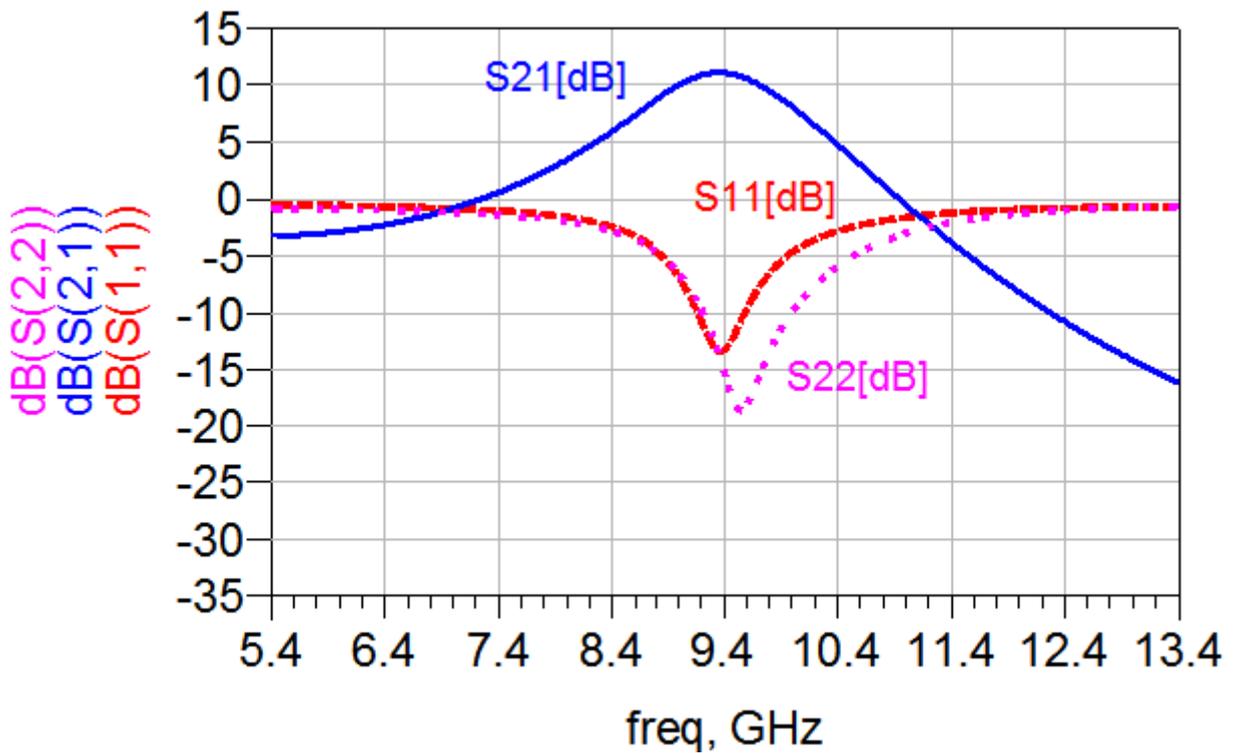


図 3-7 50 W 出力級 GaN 増幅器の S パラメータシミュレーション結果

3-2-2 製作構造と製作手法

増幅器の効果的な排熱のためには発熱源であるベアチップ周辺の製作構造が重要となる。本研究で採用したベアチップ周辺の断面構造を図 3-8 に示す。ベアチップは 3 mm 厚の金属製のプレートに直接

半田付けを行う構造とし、プレートおよび半田材料には表 3-3 を参考に最も熱伝導率の良い銅 (Cu) と Sn-3.0/Ag-0.5/Cu を使用した。これらの製作手法は宇宙用途として実証された方式である^[3-12]。製作構造と完成品の外観写真を図 3-9 に示す。

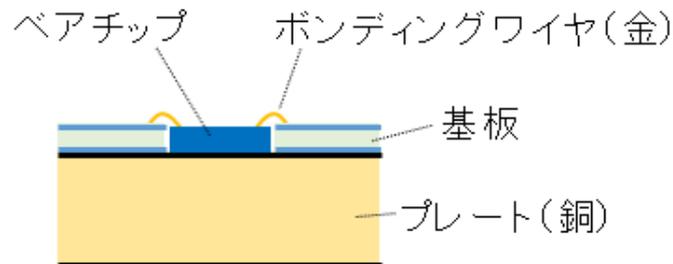
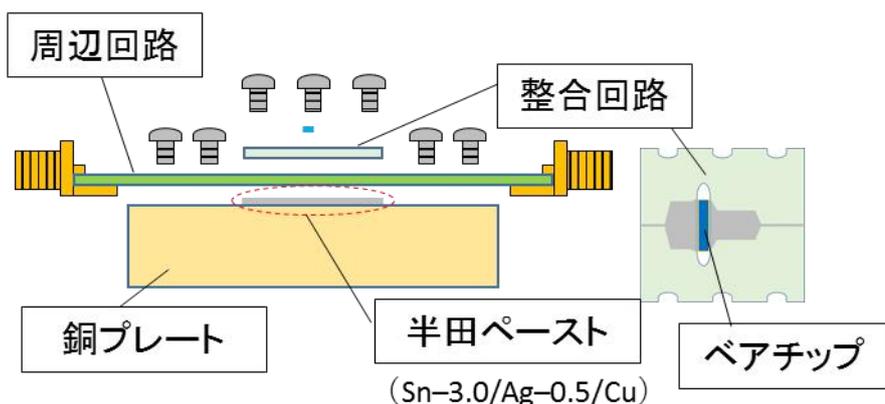


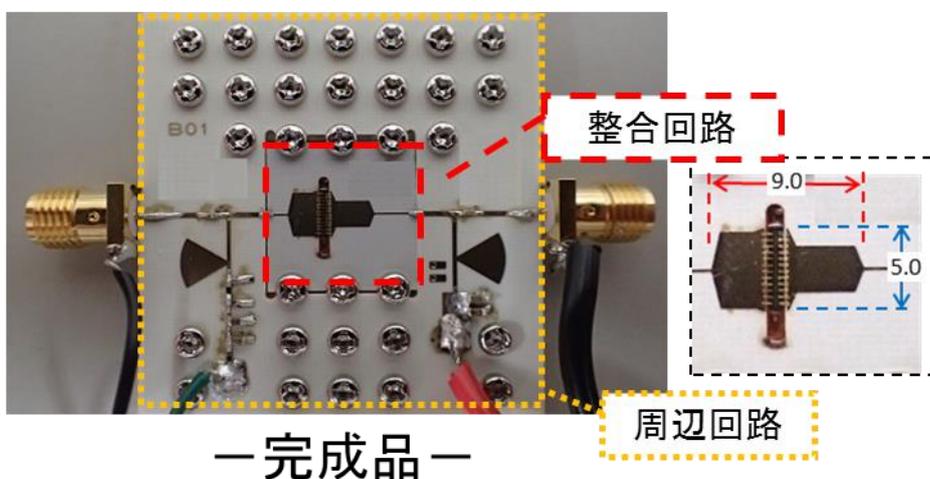
図 3-8 ベアチップ周辺の断面構造

表 3-3 代表的な半田材料およびプレート材の熱伝導率

プレート材	熱伝導率 [W/m·K]	半田材料	熱伝導率 [W/m·K]
Cu	400	Sn-3.0/Ag-0.5/Cu	64
CuMo	182-280	Au-20/Sn	57
Al	218	Sn-37/Pb	54
-	-	Ag paste	25



— 製作構造 —



— 完成品 —

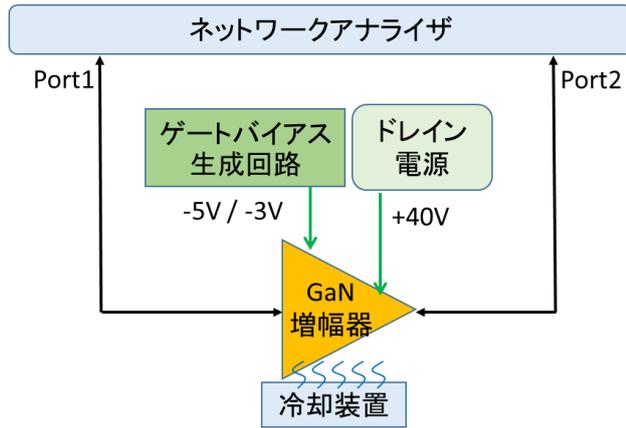
図 3-9 50 W 出力級 GaN 増幅器の外観

3-2-3 基本性能評価

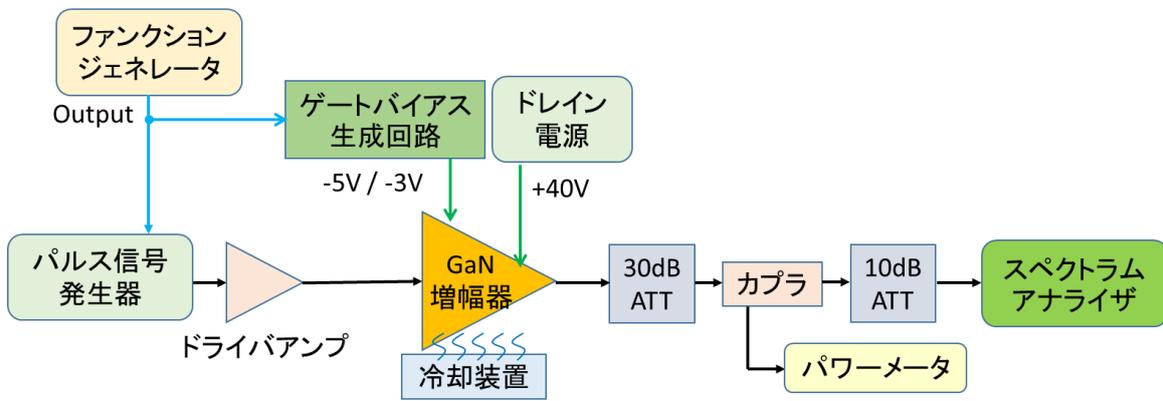
試作した増幅器に対し、小信号における S パラメータや最大出力電力、効率等の高出力増幅器として基本的な性能の評価を実施した。測定系を図 3-10 に示す。小信号特性はネットワークアナライザを用いてパルス信号ではなく CW（連続波）により測定を行った。大信号測定はパルス動作の制御をファンクションジェネレータにて行い、パルス信号発生器の高周波信号の ON/OFF およびゲートバイアスのスイッチング動作を制御した。ドレイン電圧は常に印加した状態であり、小信号測定も含め、増幅器は常温を保つよう冷却装置の上に配置した。大信号測定時のパルス信号諸元は、パルス幅 10 μ s でデューティ比 10 % である。

小信号特性の測定結果を図 3-11 に示す。図には併せて設計結果も点線により示した。若干の差異はあるものの、設計と実測はよく一致している。

表 3-4 には大信号測定の結果を示した。提案システムで使用する 9.4 GHz 帯では 60 W を超える出力レベルを 30 % 以上の効率で達成することができた。目標とした 50 W 出力時の利得は約 9 dB となる。9.4 GHz における入出力特性を図 3-12 に示す。



(a). 小信号測定系



(b). 大信号測定系

図 3-10 高出力増幅器の基本性能評価における測定系

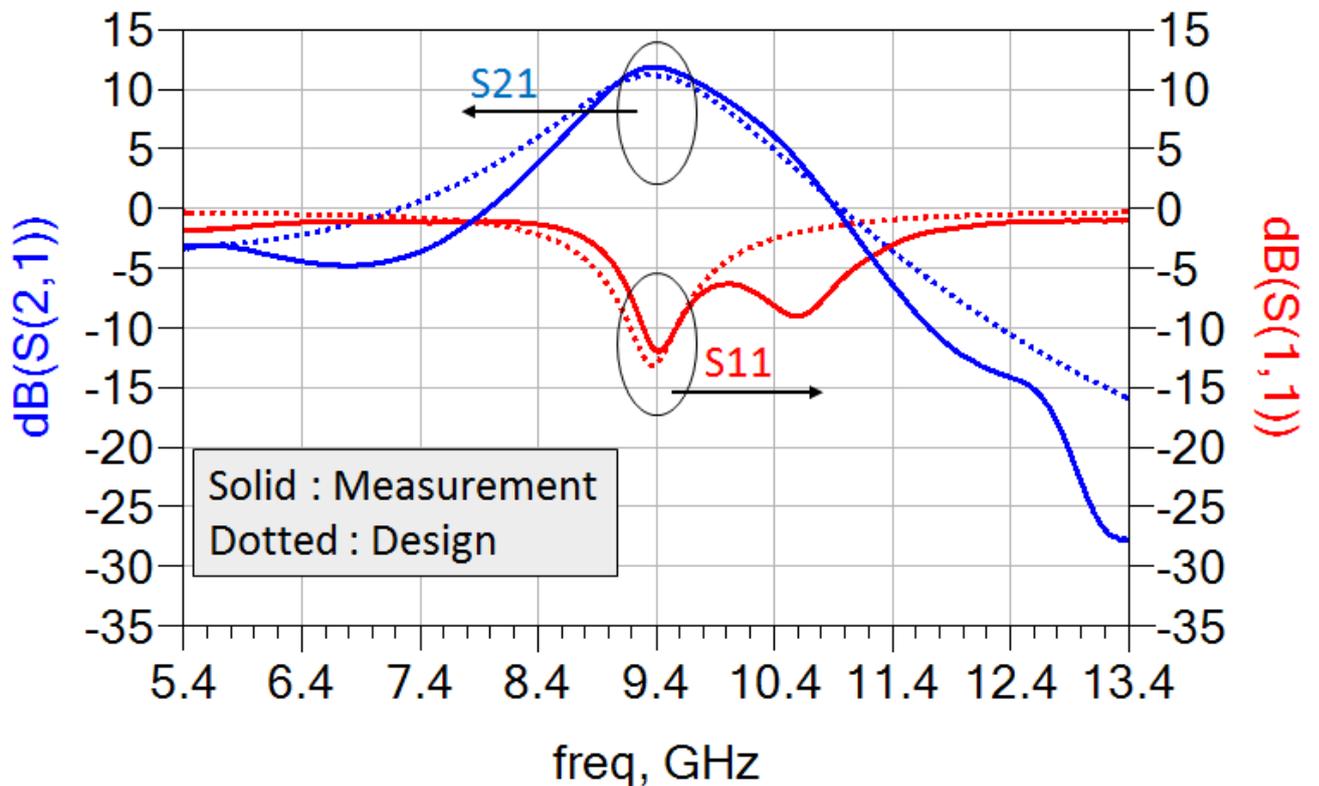


図 3-11 試作した 50 W 出力級 GaN 増幅器の S パラメータ測定結果

表 3-4 試作した 50 W 出力級 GaN 増幅器の大信号特性測定結果

	50 W 出力級 GaN 増幅器		
	9.3 GHz	9.4 GHz	9.5 GHz
最大出力	47.3 dBm (53.7 W)	47.8 dBm (60.3 W)	48.5 dBm (70.8 W)
利得	7.3 dB	7.6 dB	8.5 dB
ドレイン 効率	28.0 %	32.1 %	38.5 %
電力付加 効率	22.8 %	26.5 %	33.1 %

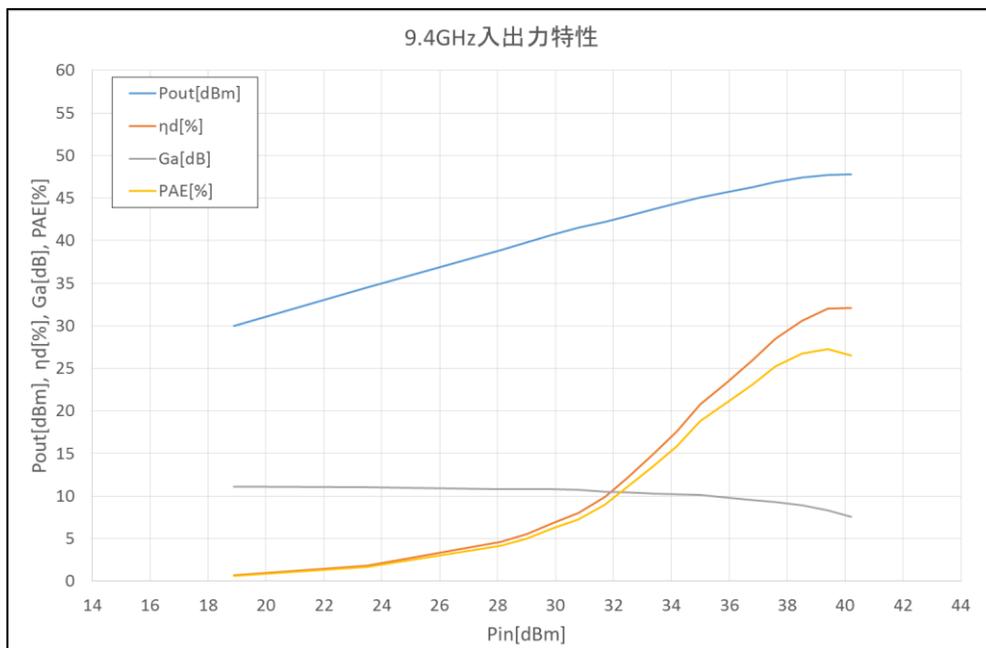


図 3-12 試作した 50 W 出力級 GaN 増幅器の中心周波数における入出力特性の測定結果

3-2-4 合成による GaN 増幅器の高出力化

増幅器のさらなる高出力化のためには、複数台の増幅器を製作した場合に個別調整を必要とせずとも同等の特性を再現できることが重要となる。そこで前節に示した 50 W 出力級 GaN 増幅器をさらに 5 台製作して、その性能差分を検証した。これらの測定結果を図 3-13 から図 3-19 に示す。また表 3-5 にはこれらの 9.4 GHz における比較結果を示した。結果として S パラメータおよび大信号特性とも、よく一致した結果を示しており、すべての増幅器で目標とした 50 W を超える 60 W 以上の出力を得ることができた。図中には前節に示した初回試作時の特性も点線で示しており、この結果のみ若干傾向が異なるが、これは複数製作時にはワイヤボンディングを自動化した影響が現れているものと考えられる。

次に合成による高出力化の効果を確認するための試作を行った。合成に供した回路はウィルキンソン型電力合成・分配回路であり、この試作結果と測定結果をそれぞれ図 3-20、図 3-21 に示す。結果として通過損失が 0.6 dB、アイソレーションは 25 dB 程度の性能であった。このウィルキンソン型回路と

50 W 出力級 GaN 増幅器を 2 つ用いて構築をした 100 W 出力級 GaN 増幅器の外観を図 3-22 に示す。回路では入出力それぞれにウィルキンソン型回路を挿入し、2 つの 50 W 出力級 GaN 増幅器を並列に動作させている。大信号測定結果を表 3-6 に示す。所望の周波数において 100 W を超える出力を得ることができ、合成による高出力化の効果を確認することができた。

複数製作時においても無調整で再現性の良い性能が得られたこと、および合成により所望の出力増加が得られたことから、さらなる高出力化に向けためどを得ることができたと考える。図 3-23 には参考として、X 帯における導波管構造の 8 合成回路の外観と測定結果例を示すが^[3-13]、この挿入損失は 0.2 dB 程度であり、同様の合成回路と表 3-5 の増幅器を用いれば 400 W 出力化が可能であると考えられる。

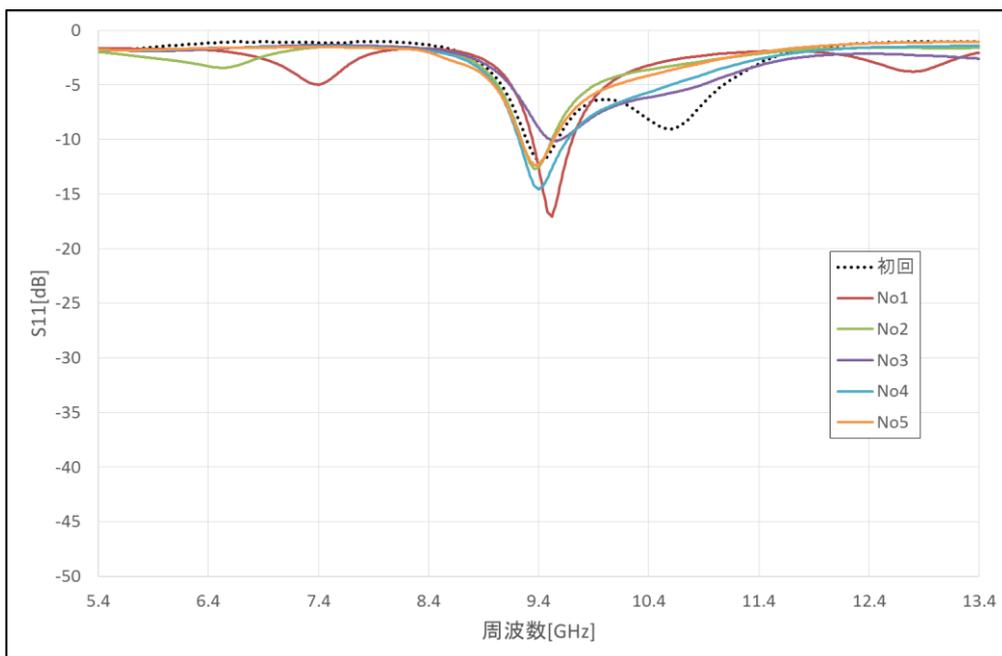


図 3-13 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__S11

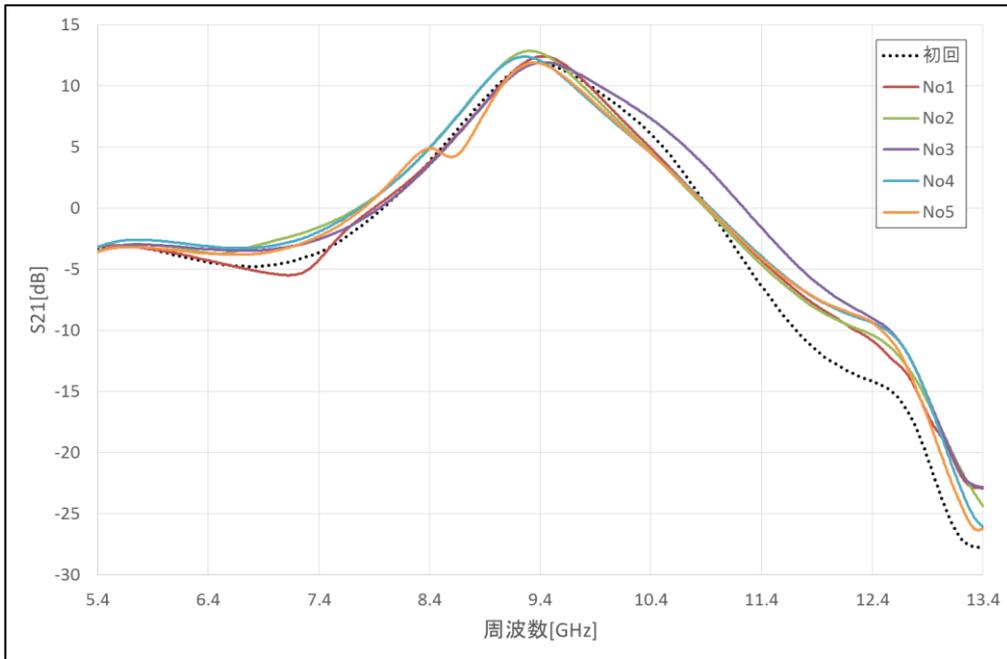


図 3-14 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果_S21

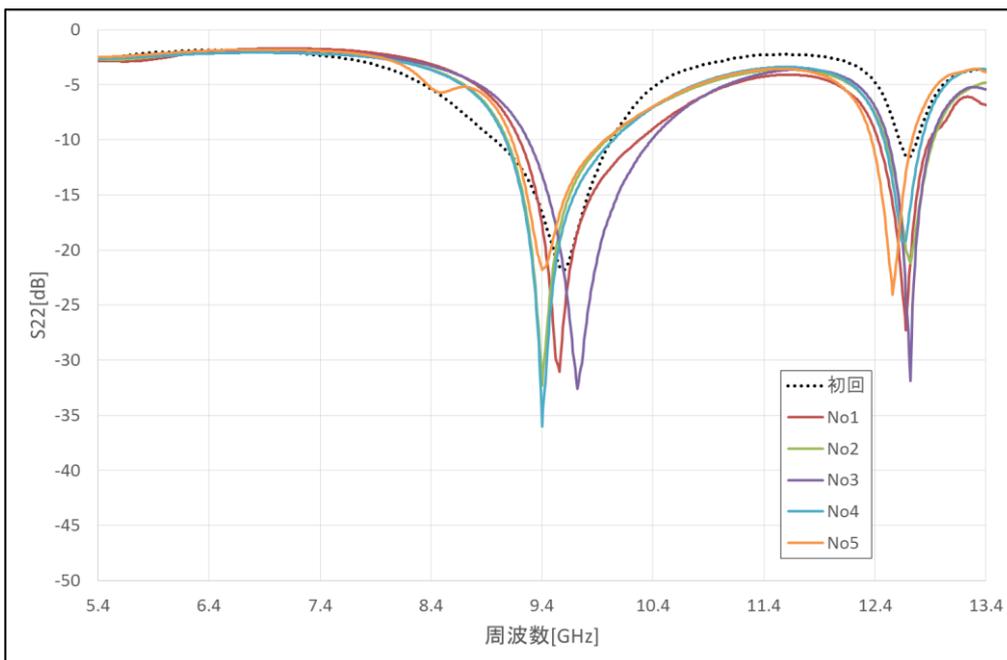


図 3-15 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果_S22

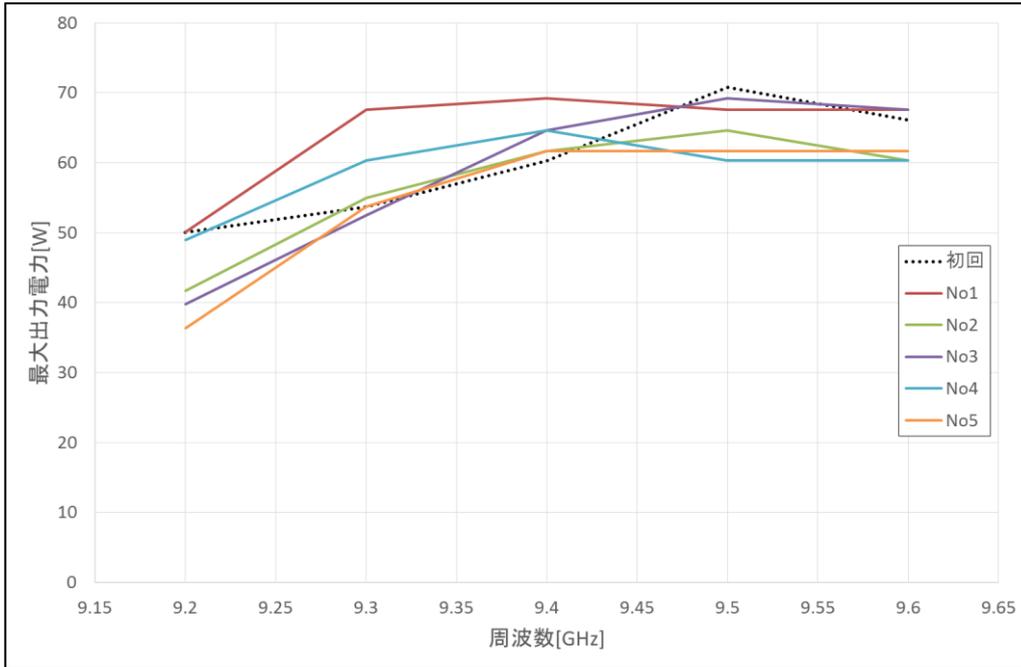


図 3-16 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果_最大出力特性

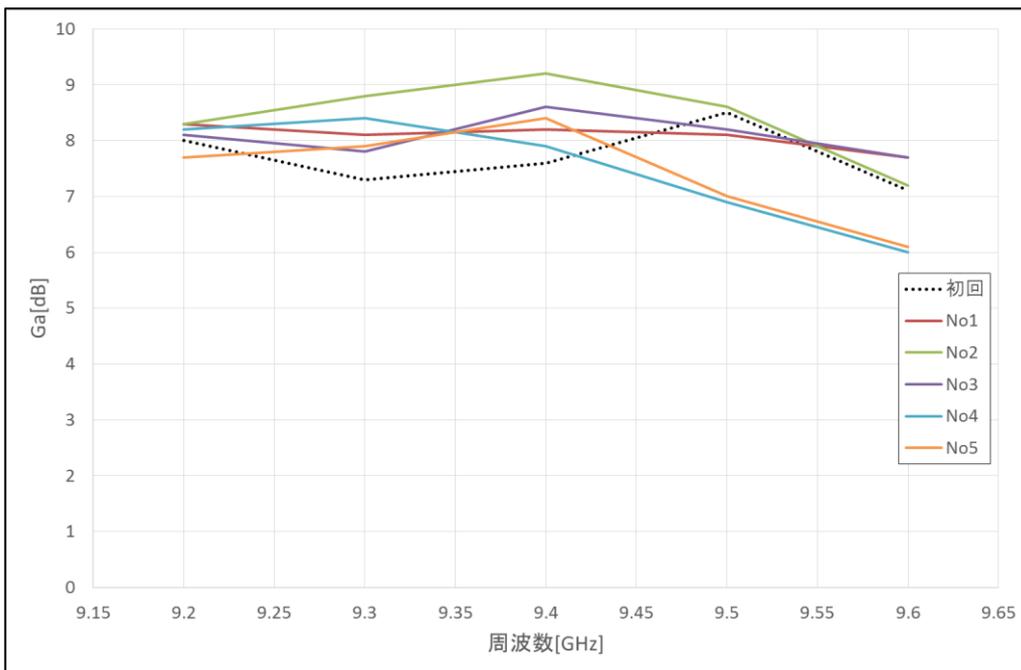


図 3-17 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果_最大出力時利得

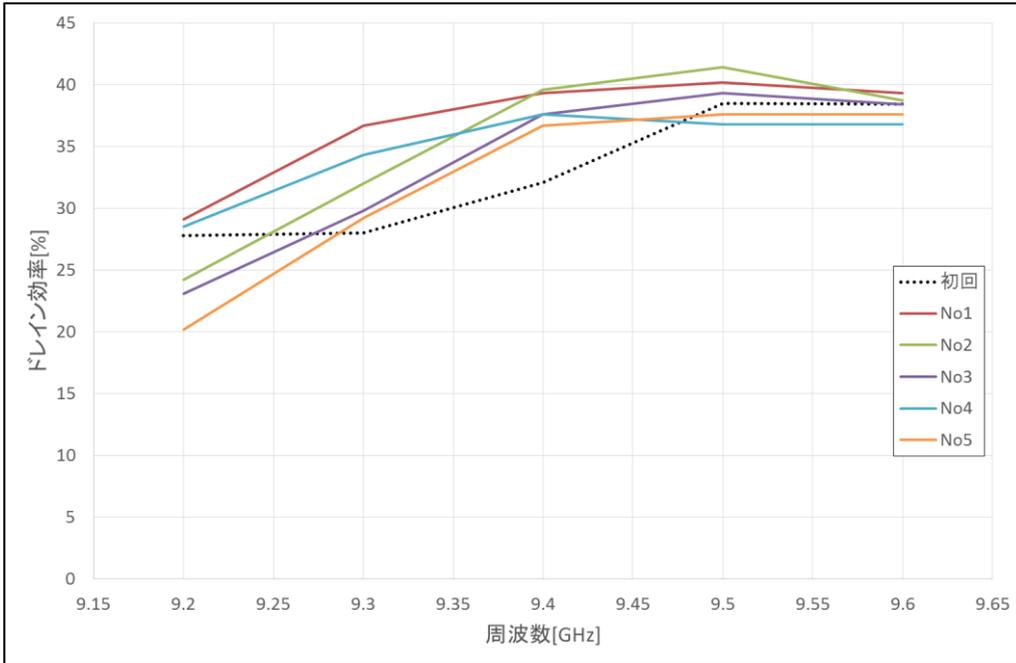


図 3-18 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__ドレイン効率

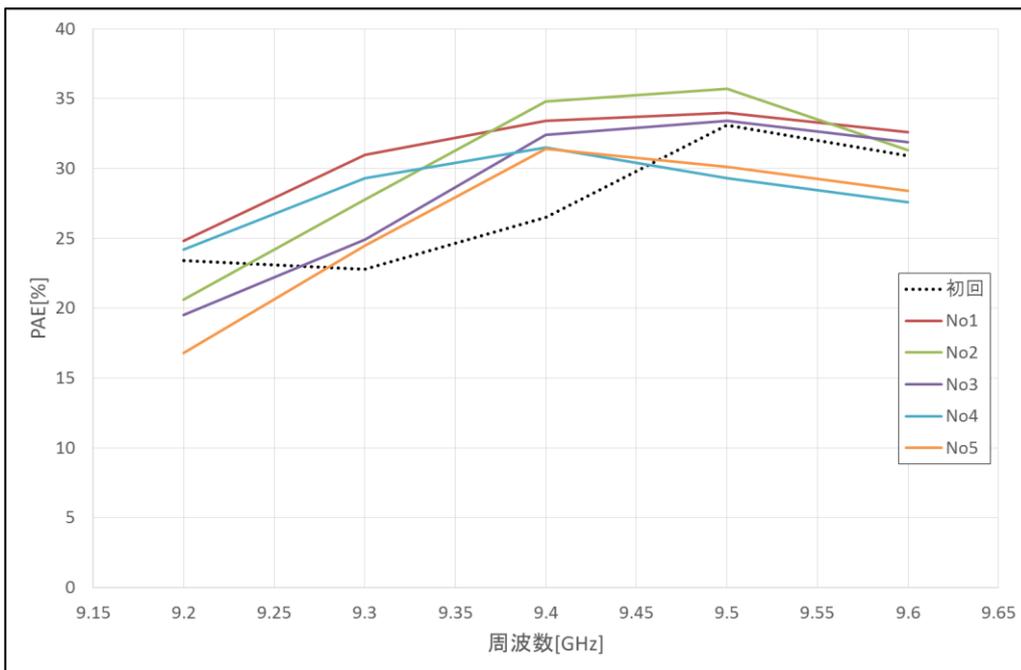


図 3-19 複数製作時の 50 W 出力級 GaN 増幅器の測定結果__電力付加効率

表 3-5 50 W 出力級 GaN 増幅器の 5 台製作時の大信号特性比較

	最大	平均	最小	差分
最大出力	48.4 dBm (69.2 W)	48.1 dBm (64.4 W)	47.9 dBm (61.7 W)	±0.25 dB (±3.75 W)
利得	9.2 dB	8.5 dB	7.9 dB	±0.65 dB
ドレイン効率	39.6%	38.2%	36.7%	±1.45%
電力付加効率	34.8%	32.7%	31.4%	±1.7%

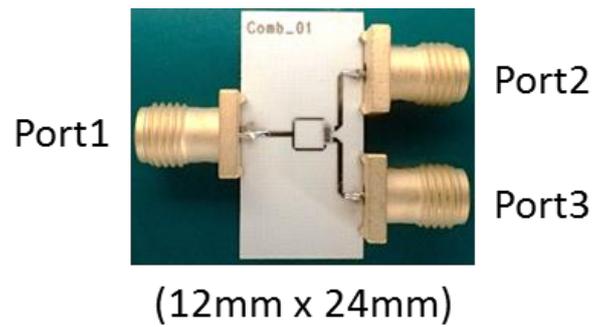


図 3-20 試作したウィルキンソン型電力合成・分配回路

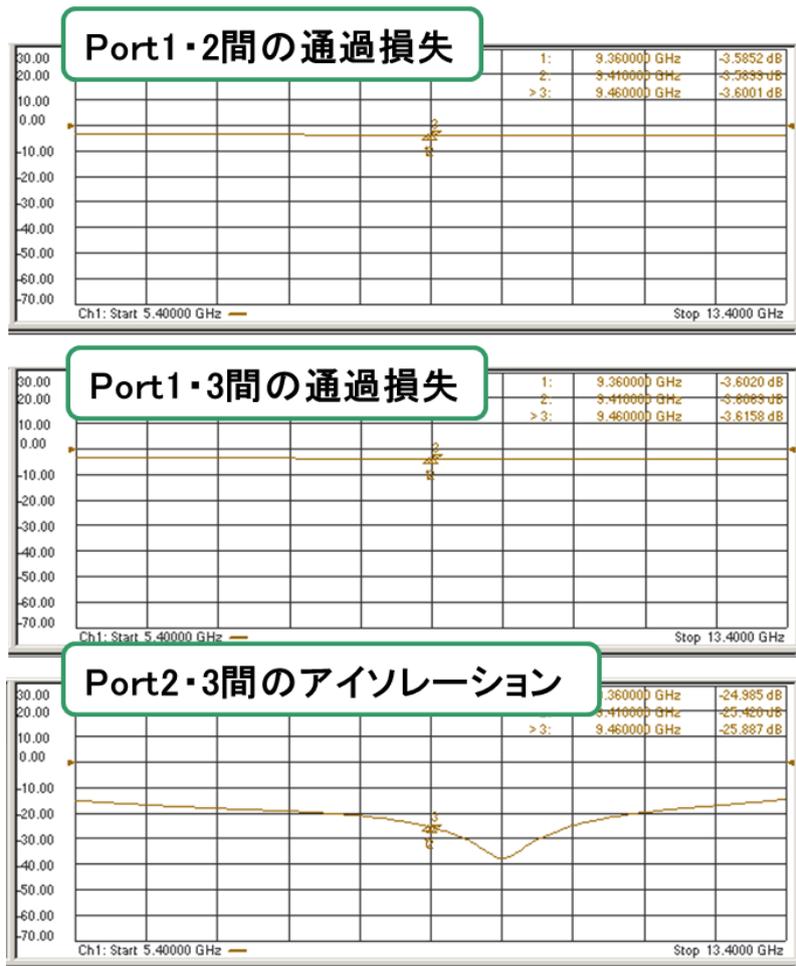


図 3-21 試作したウィルキンソン型電力合成・分配回路の測定結果

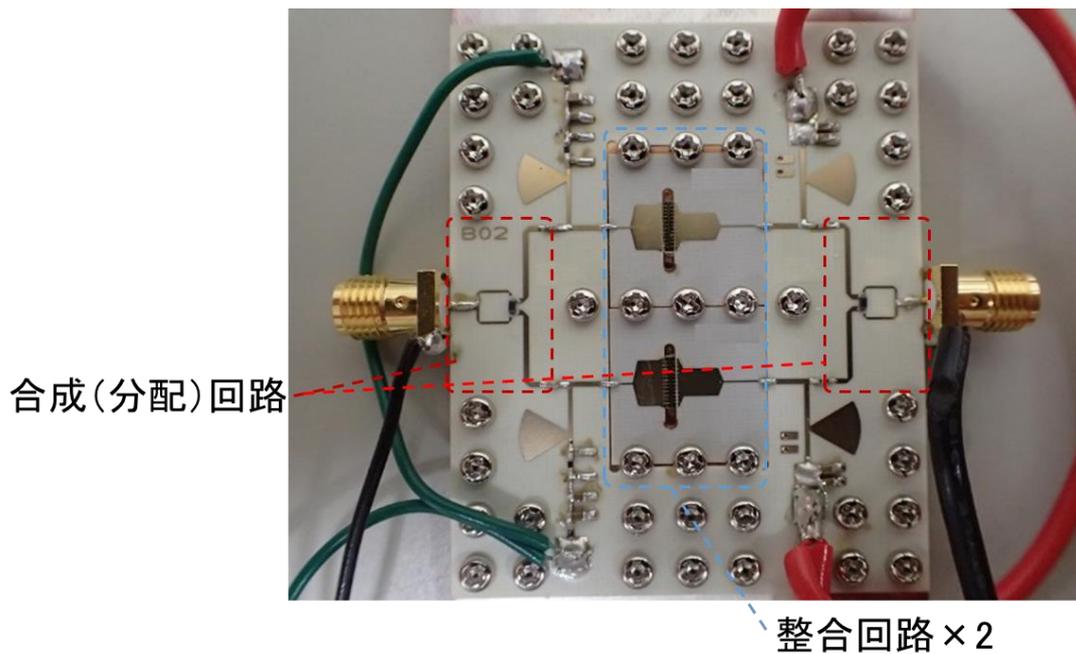


図 3-22 100 W 出力級 GaN 増幅器の外観

表 3-6 試作した 100 W 出力級 GaN 増幅器の大信号特性測定結果

	100 W 出力級 GaN 増幅器		
	9.3 GHz	9.4 GHz	9.5 GHz
最大出力	49.9 dBm (97.7 W)	50.2 dBm (104.7 W)	51.0 dBm (125.9 W)
利得	6.0 dB	6.5 dB	6.6 dB
ドレイン 効率	23.0 %	25.4 %	31.5 %
電力付加 効率	17.2 %	19.7 %	24.6 %

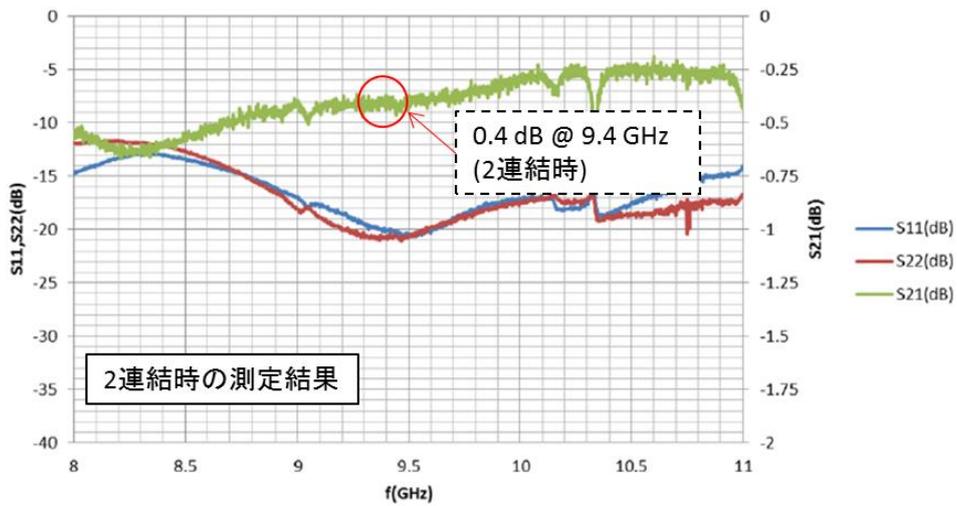
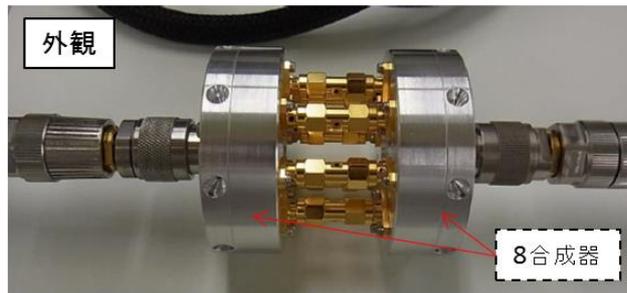


図 3-23 導波管構造の 8 合成回路の例

3-3 使用条件の差異に着目をしたパルス信号の時間波形評価

3-3-1 測定系と測定結果の定義

本節では試作をした高出力 GaN 増幅器を用い、使用条件の差異に着目をしたパルス動作時の時間波形の調査結果について述べる。パルス動作は図 3-24 の測定系において調査を行った。ネットワークアナライザは Keysight 社の N5242A という型名のもので、パルスジェネレータを内蔵しており、パルス動作中の振幅・位相特性が測定できる。パルス動作の制御は大信号測定の際と同様にファンクションジェネレータが司り、ネットワークアナライザの高周波信号の ON / OFF と GaN 増幅器のゲートバイアスの切り替えを行う。オシロスコープは各種制御信号の確認用である。オシロスコープの取得波形例を図 3-25 に示す。図中の基準信号はパルス動作の基となる信号で、すべての制御はこの信号に同期して行われる。ゲートバイアスはファンクションジェネレータの出力電力をゲートバイアス生成回路でレベル変換を行ってから GaN 増幅器に供給される。RF 切替信号はネットワークアナライザの内部設定により、基準信号からの遅延時間が設定可能である。本研究の測定では、ゲートバイアスの切り替えが高周波信号の挙動に影響を与えないようにこの遅延を 1 μ s に設定した。これをタイミングマージンと呼称する。ゲートバイアスおよび GaN 増幅器から出力される高周波信号の立ち上がり、立ち下がり特性をそれぞれ図 3-26, 図 3-27 に示す。これらは 3-2-4 節で紹介した 5 台製作したものの結果である。表 3-7 にはこの数値結果をまとめたが、ゲートバイアスおよび高周波信号の立ち上がりおよび立ち下がり時間はタイミングマージンに対して十分に小さい値となっている。なおネットワークアナライザの時間分解能は 50 ns であるため、これより小さな値は確認できない。

この調査ではネットワークアナライザによりパルス信号区間内の振幅・位相特性を測定した。測定結果は信号が立ち上がった直後から、立ち下がる直前までの振幅・位相を、立ち上がり直後の値を基準として表記する。調査では主に信号区間における振幅・位相の変動幅（信号区間内の最大と最小の差）に着目をした。50 W 出力級 GaN 増幅器におけるパルス信号の諸元（出力電力、パルス幅、デューティ比）の変更による影響、および周囲温度の変化に対する影響について次節で述べる。

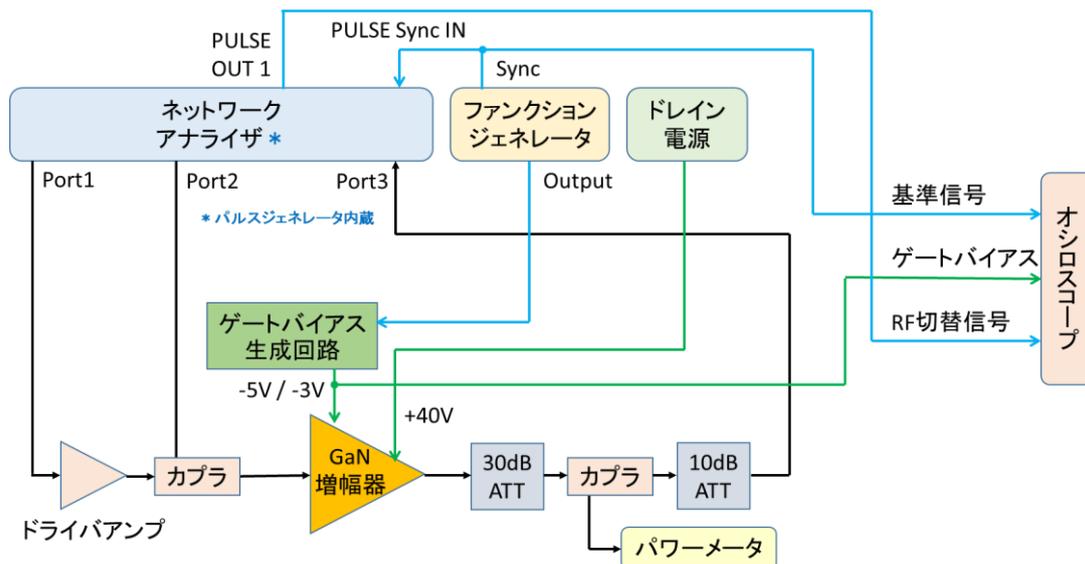


図 3-24 パルス動作時の挙動調査における測定系

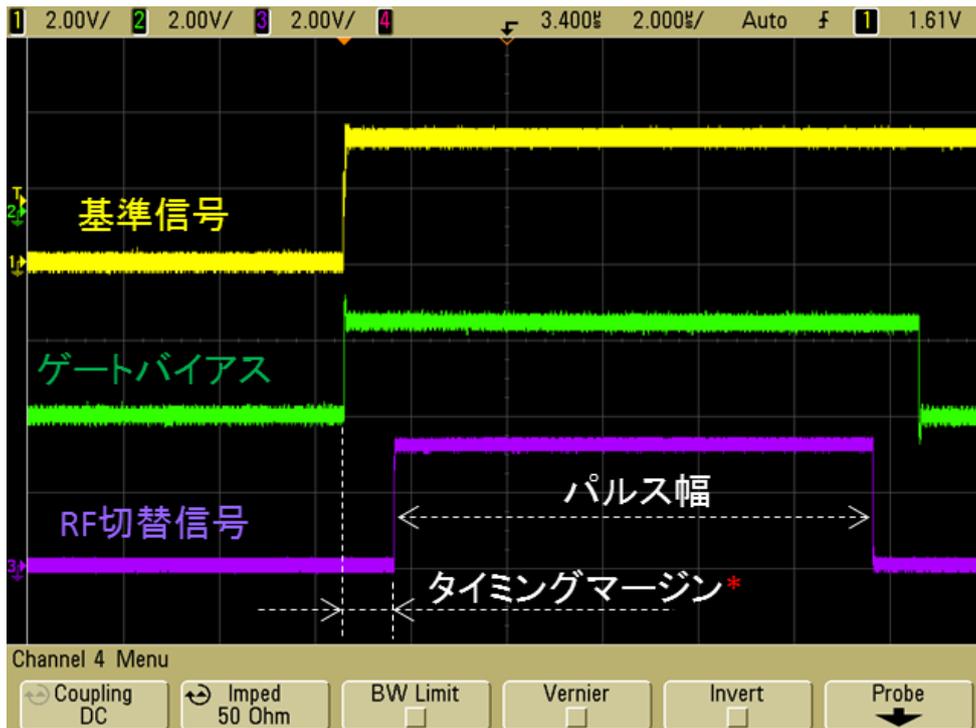


図 3-25 オシロスコープの取得波形例

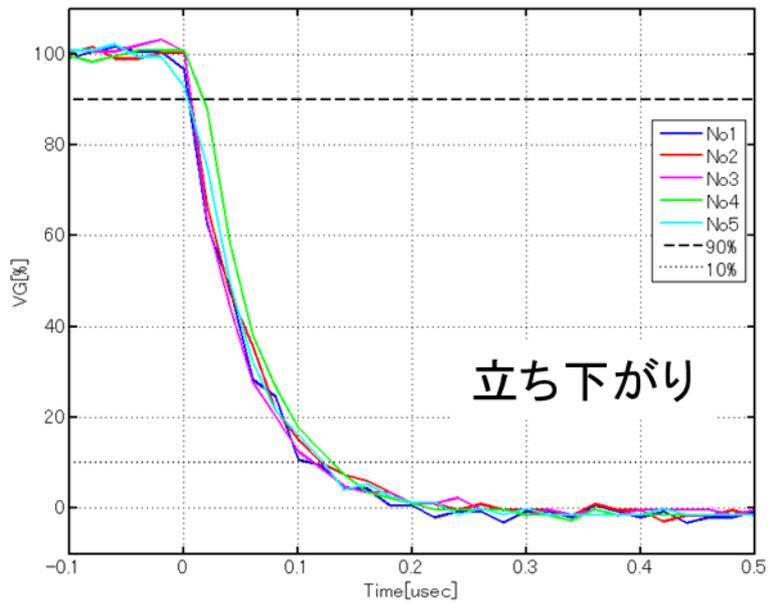
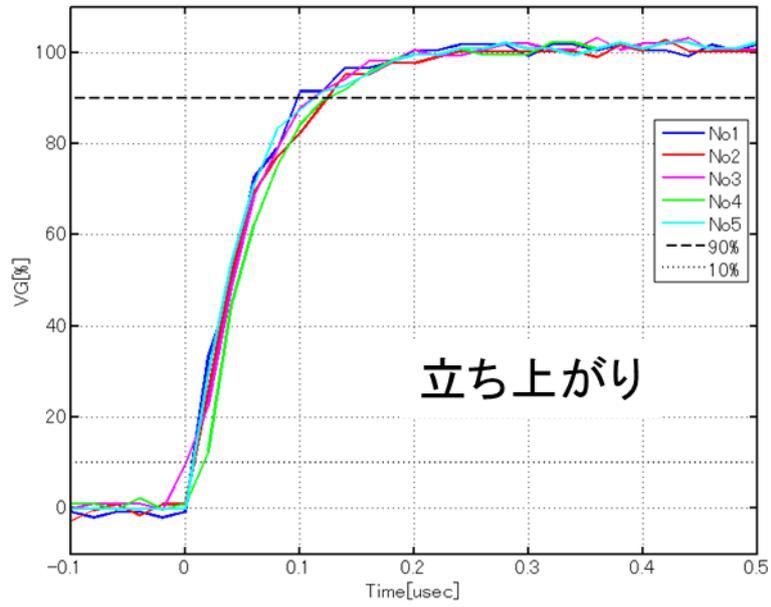


図 3-26 ゲートバイアスの立ち上がり，立ち下がり特性

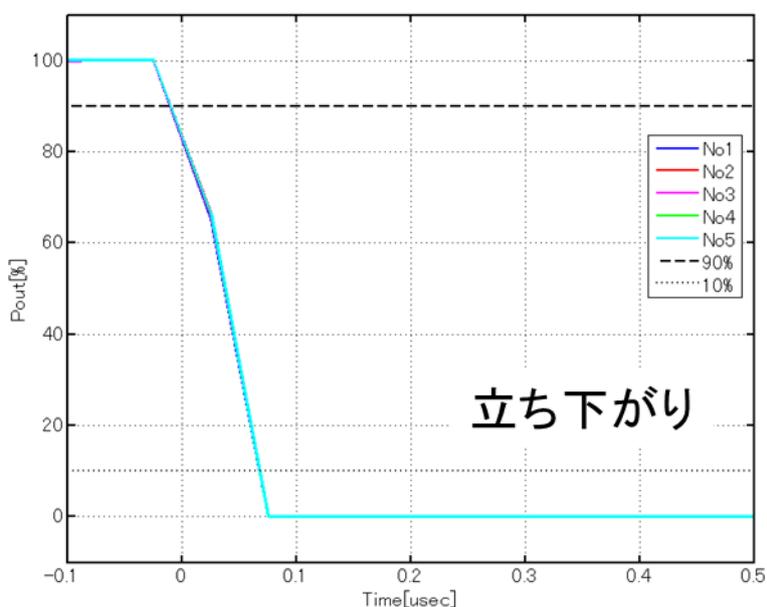
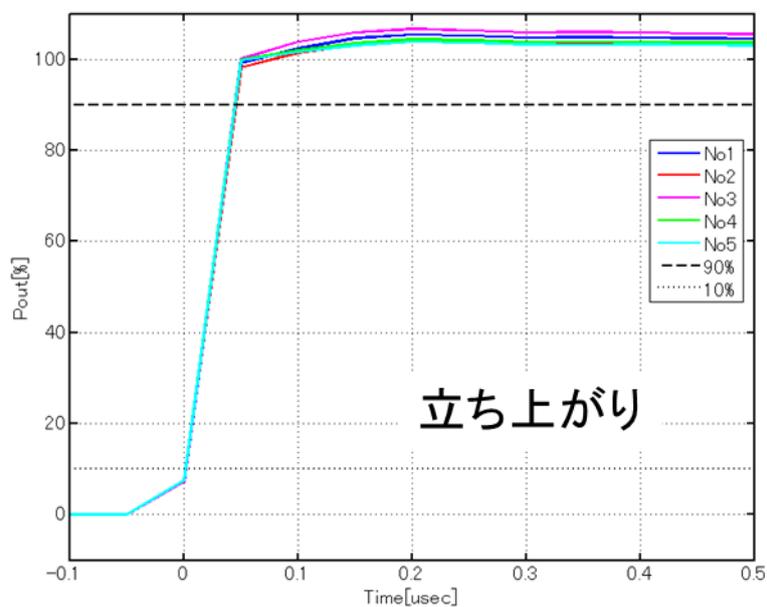


図 3-27 GaN 増幅器の高周波信号出力の立ち上がり，立ち下がり特性

表 3-7 ゲートバイアスおよび高周波信号出力の立ち上がり，立ち下がり時間の測定結果

ゲートバイアス			高周波信号出力		
立ち上がり [μs]	最大	0.14	立ち上がり [μs]	最大	0.05
	平均	0.124		平均	0.05
	最小	0.1		最小	0.05
立ち下がり [μs]	最大	0.14	立ち下がり [μs]	最大	0.1
	平均	0.128		平均	0.1
	最小	0.12		最小	0.1

3-3-2 使用条件の差異による時間波形への影響

まずパルス動作時の基本的な挙動を、2-2-4節で定義した再突入カプセル捕捉用システムのパルス信号諸元における測定結果により説明する。測定結果を図 3-28 に、設定した信号諸元と信号区間内の変動幅を表 3-8 に示す。振幅は立ち上がり直後に最も大きく、その後緩やかに下降していく。位相は立ち上がり直後から徐々にプラス方向にシフトしていき、5 μ s 付近で安定領域に入る。これらの挙動は増幅器の発熱による影響であることが報告されている^{[3-6] - [3-8]}。

使用条件の差異として、まずは出力レベルとパルス幅、デューティ比といった信号諸元による影響を調査した。測定結果をそれぞれ図 3-29～図 3-31 に、信号諸元と変動幅をそれぞれ表 3-9～表 3-11 に示す。信号区間内の振幅・位相の挙動は、程度の違いはあるが、すべての信号諸元において基本特性と同じ傾向が見られた。振幅・位相の変動幅についてはパルス幅の変化に対するものが最も顕著であり、パルス幅が長くなるほどに大きくなった。図 3-32 には同様の測定をさらに 2 台の増幅器に対して行った際の変動幅を横軸にパルス幅を取って示したが、この傾向はいずれの増幅器においても現れている。また 5 μ s 付近で安定領域に入ることから、パルス幅 5 μ s に対しては顕著な安定領域が存在しない。

次に周囲温度による影響を調査した。測定結果を図 3-33 に、信号諸元と変動幅を表 3-12 に示す。周囲温度の変化に対しては信号区間内の挙動に大きな影響があった。常温 (+25 $^{\circ}$ C) より高い温度領域では概ね基本特性と同様の信号波形であったが、0 $^{\circ}$ C 以下の低温領域では大きく傾向が変化し、低温になるほどに立ち上がりが非常に急峻になって、-20 $^{\circ}$ C ではオーバーシュートを示した。同様の測定をさらに 2 台に実施したときの結果を図 3-34、図 3-35 に示したが、程度の差異はあるものの同じ傾向であることが確認できる。

以上より信号諸元の影響は主にパルス信号区間内の振幅・位相の変動幅に影響し、周囲温度の影響は特に低温領域において 5 μ s 以下の信号波形に影響することがわかった。ただし変動幅は最大でも振幅 0.64 dB、位相 3.17 deg であり、用途にもよるが、システムに対してそれほど大きな影響は生じないものと考えられる。

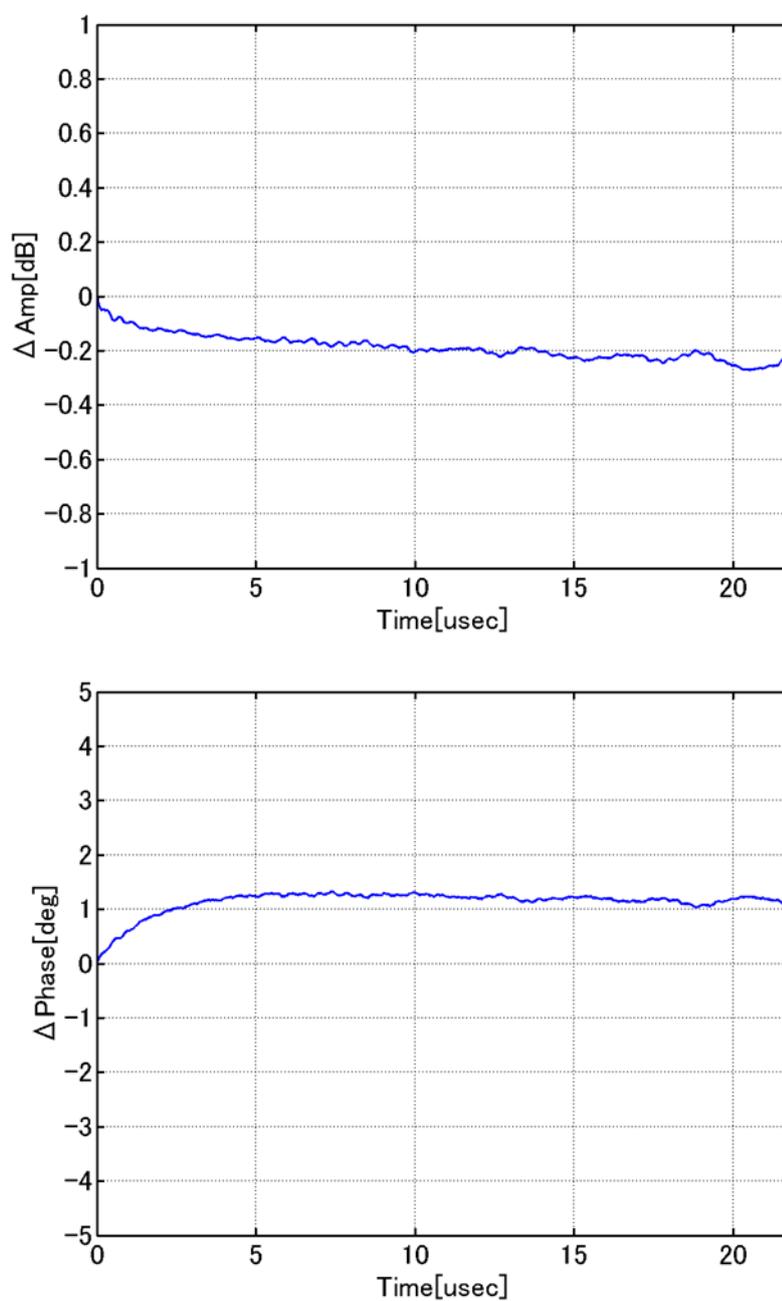


図 3-28 基本設定における測定結果

表 3-8 基本設定における振幅・位相の変動幅

周波数 [GHz]	出力電力 [W]	パルス幅 [μs]	デューティ比 [%]	振幅変動幅 [dB]	位相変動幅 [deg]
9.4	50	22	6.6	0.27	1.33

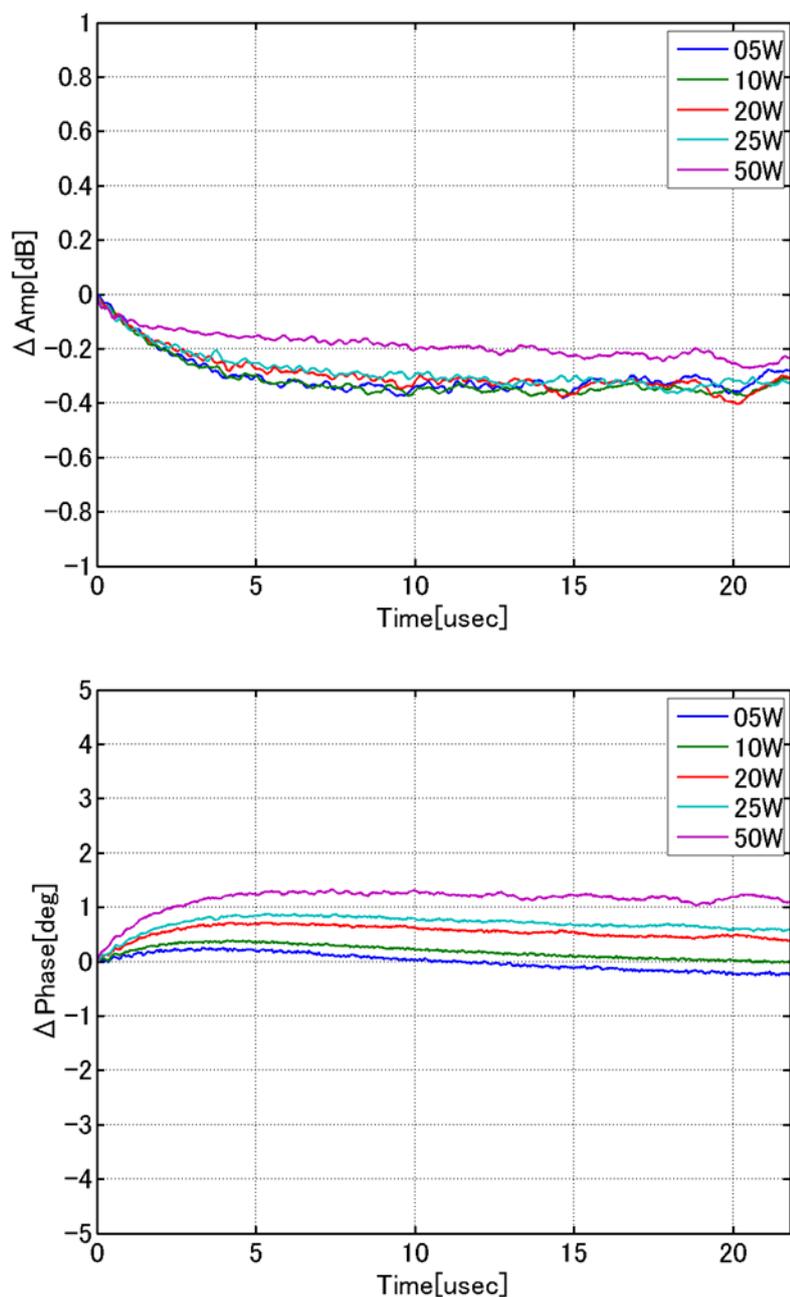


図 3-29 出力レベルを変化させた場合における振幅・位相の測定結果

表 3-9 出力レベルを変化させた場合における振幅・位相の変動幅

周波数 [GHz]	出力電力 [W]	パルス幅 [μs]	デューティ比 [%]	振幅変動幅 [dB]	位相変動幅 [deg]
9.4	5	22	6.6	0.38	0.51
	10			0.37	0.40
	20			0.40	0.71
	25			0.36	0.87
	50			0.27	1.33

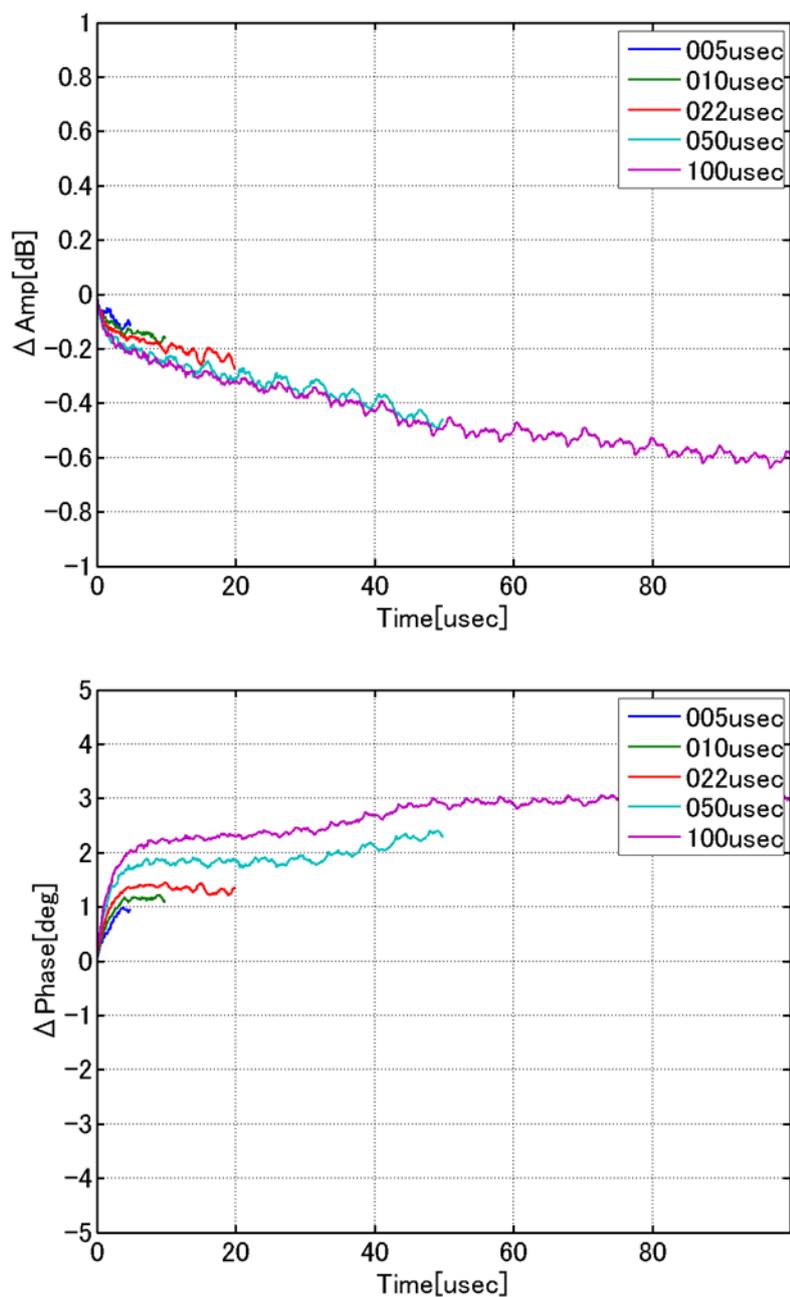


図 3-30 パルス幅を変化させた場合における振幅・位相の測定結果

表 3-10 パルス幅を変化させた場合における振幅・位相の変動幅

周波数 [GHz]	出力電力 [W]	パルス幅 [μs]	デューティ比 [%]	振幅変動幅 [dB]	位相変動幅 [deg]
9.4	50	5	6.6	0.13	1.00
		10		0.19	1.22
		22		0.27	1.46
		50		0.49	2.40
		100		0.64	3.17

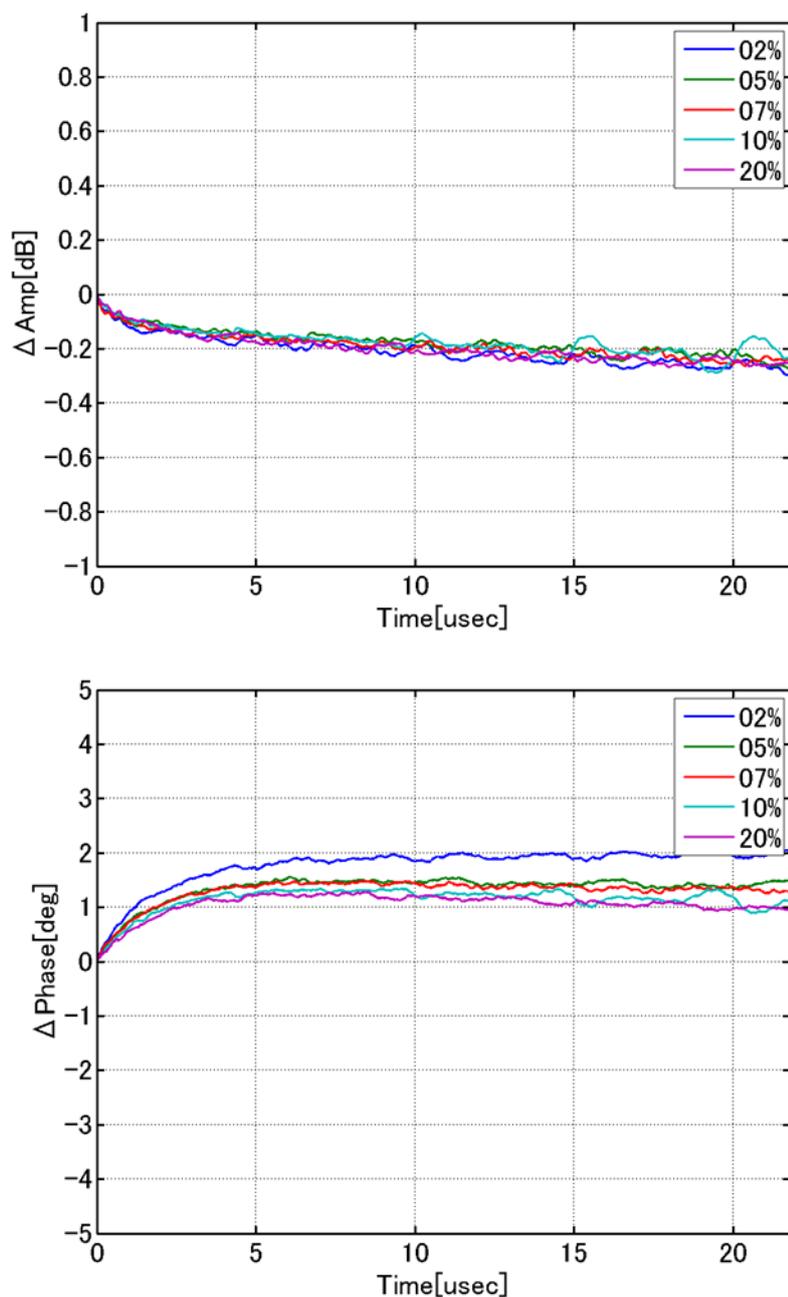


図 3-31 デューティ比を変化させた場合における振幅・位相の測定結果

表 3-11 デューティ比を変化させた場合における振幅・位相の変動幅

周波数 [GHz]	出力電力 [W]	パルス幅 [μs]	デューティ比 [%]	振幅変動幅 [dB]	位相変動幅 [deg]
9.4	50	22	2	0.30	2.05
			5	0.27	1.56
			6.6	0.26	1.49
			10	0.29	1.34
			20	0.27	1.28

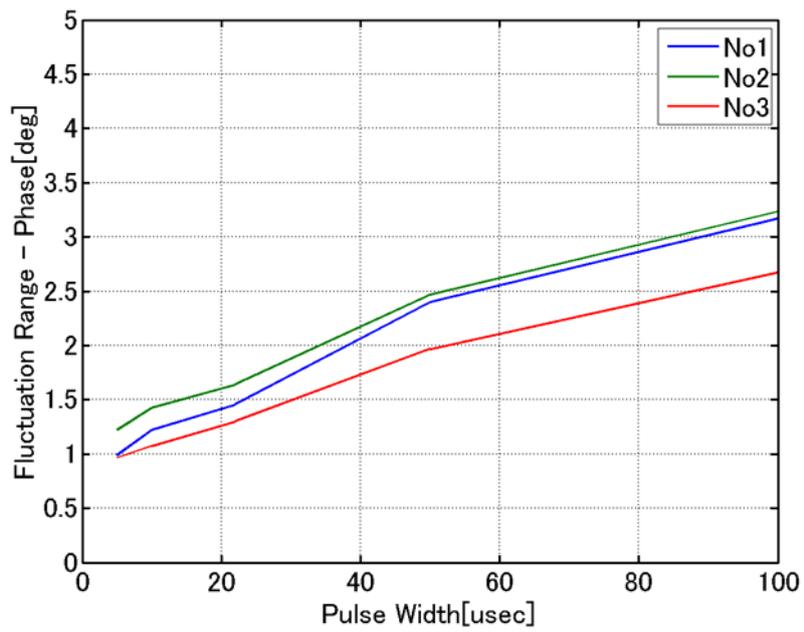
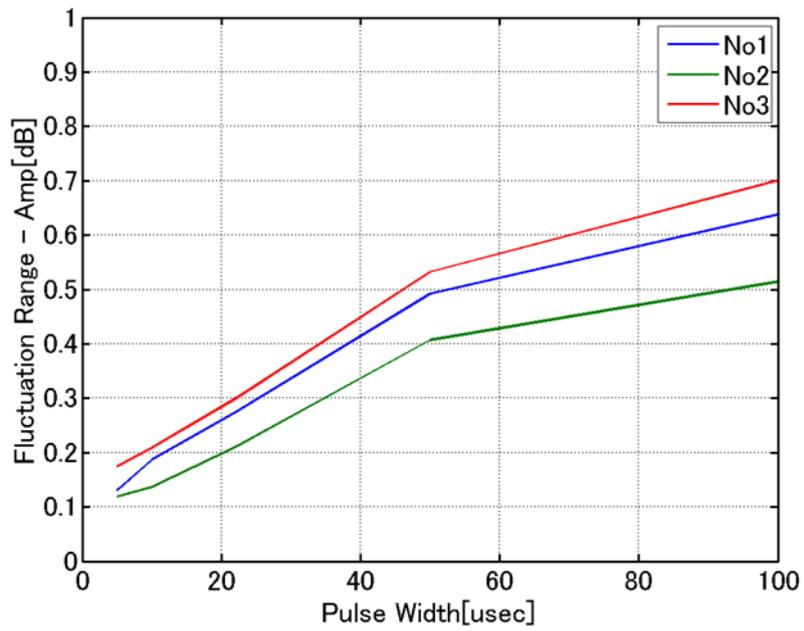


図 3-32 パルス幅に対する振幅・位相の変動幅の複数台比較

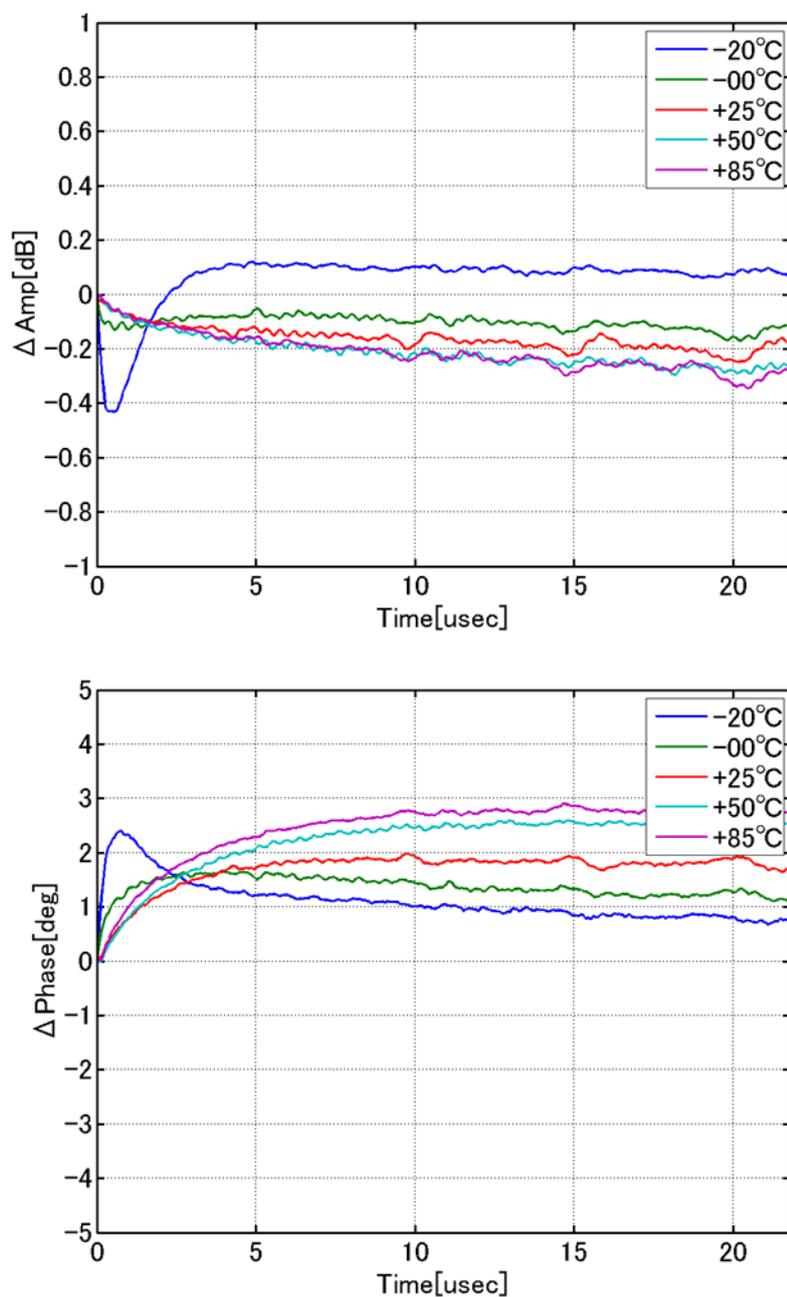


図 3-33 周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の測定結果

表 3-12 周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の変動幅

周波数 [GHz]	出力電力 [W]	パルス幅 [μ s]	デューティ比 [%]	周囲温度 [$^{\circ}$ C]	振幅変動幅 [dB]	位相変動幅 [deg]
9.4	50	22	6.6	-20	0.55	2.40
				0	0.17	1.65
				25	0.25	1.99
				50	0.30	2.67
				85	0.35	2.92

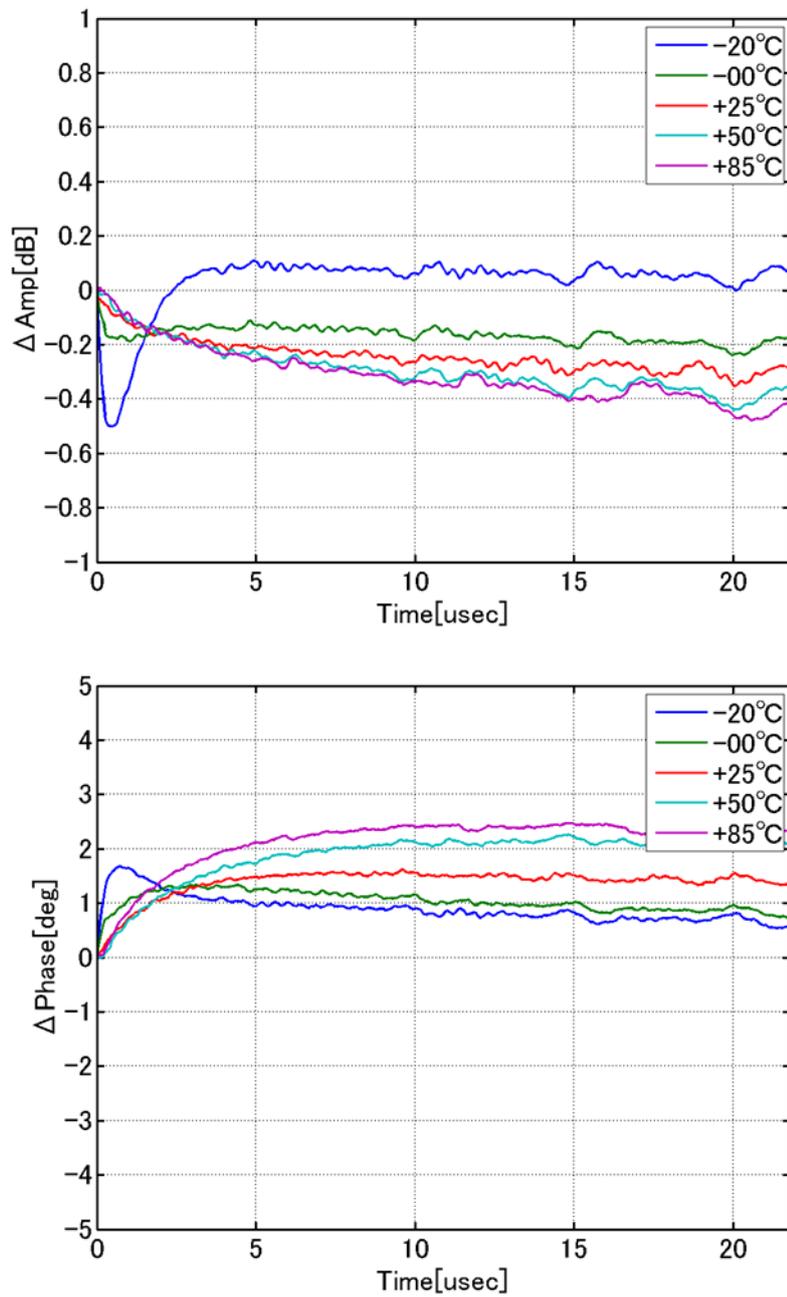


図 3-34 周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の測定結果 (2 台目)

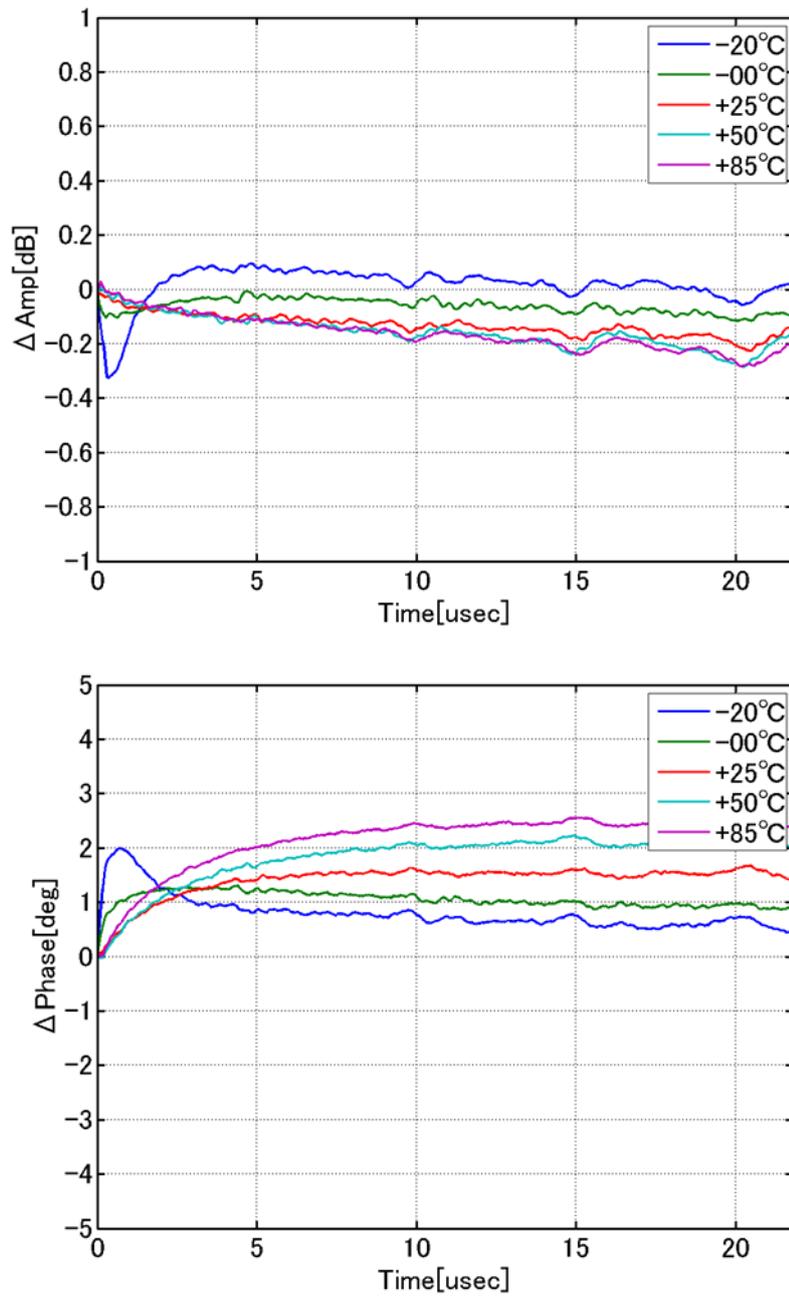


図 3-35 周囲温度を変化させた場合における振幅・位相の測定結果 (3 台目)

3-3 増幅器入出力間の波形形状に着目した評価とパルス波形歪の低減手法提案

3-3-1 測定系と測定結果の定義

本節では増幅器入出力前後の時間波形の比較を行い、パルス波形歪の傾向、およびそのパルス圧縮結果への影響について述べ、その低減手法提案を行う。測定は入出力間の波形形状の差異が顕著になるよう、3つの増幅素子を直列に接続し、高利得化を図った状態で行った。増幅器の構成と入出力特性をそれぞれ図 3-36、図 3-37 に示す。この増幅器は線形領域では 66 dB の利得を有し、最大出力は 51 dBm、このときの線形動作時との利得差は 5 dB である。

測定は図 3-38 の測定系で行った。信号解析部では表 3-13 に示した諸元の信号を出力し、可変アッテネータによりレベルを調整して増幅器に信号を入力する。増幅器から出力された信号は E/O（電気・光変換機）により光信号に変換された後、10 km の光ファイバにより遅延時間を生じさせ、O/E（光・電気変換機）を介して電気信号に復元される。信号解析部入力の可変アッテネータは信号解析部への入力レベルを一定にするために用い、光信号系は遅延信号の受信レベル低下を抑える目的で用いた。信号解析部では受信信号の記録を行う。本評価ではこの記録データを用いてオフラインでパルス波形の形状確認やパルス圧縮処理を行った。

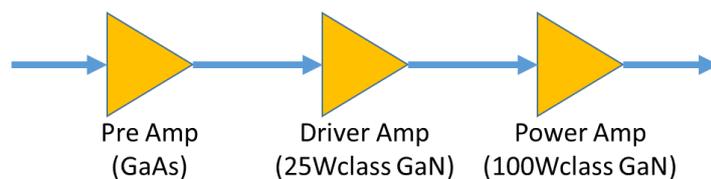


図 3-36 評価に供した増幅器の構成

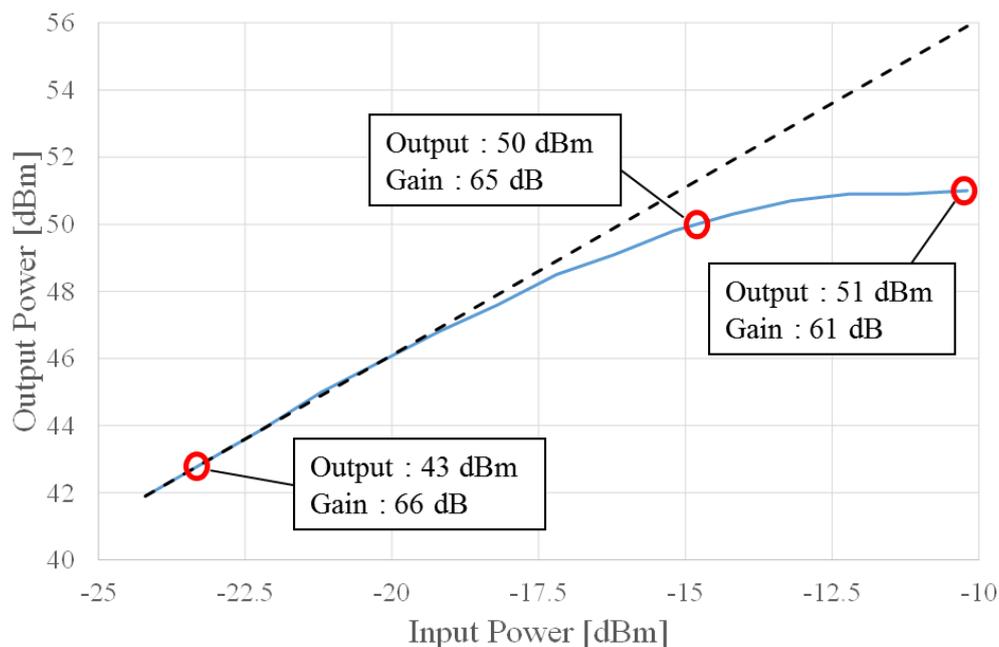


図 3-37 評価に供した増幅器の入出力特性

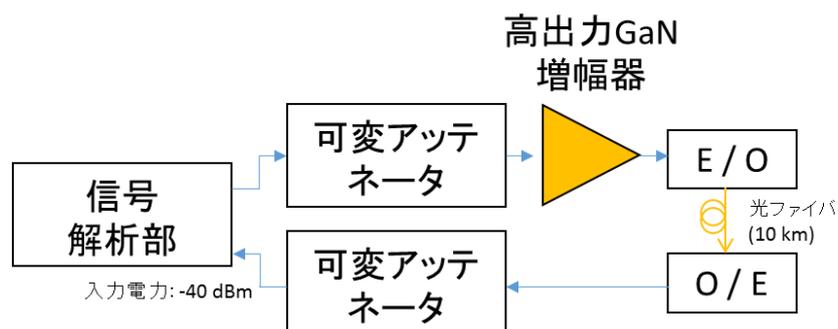


図 3-38 増幅器入出力間のパルス波形測定系

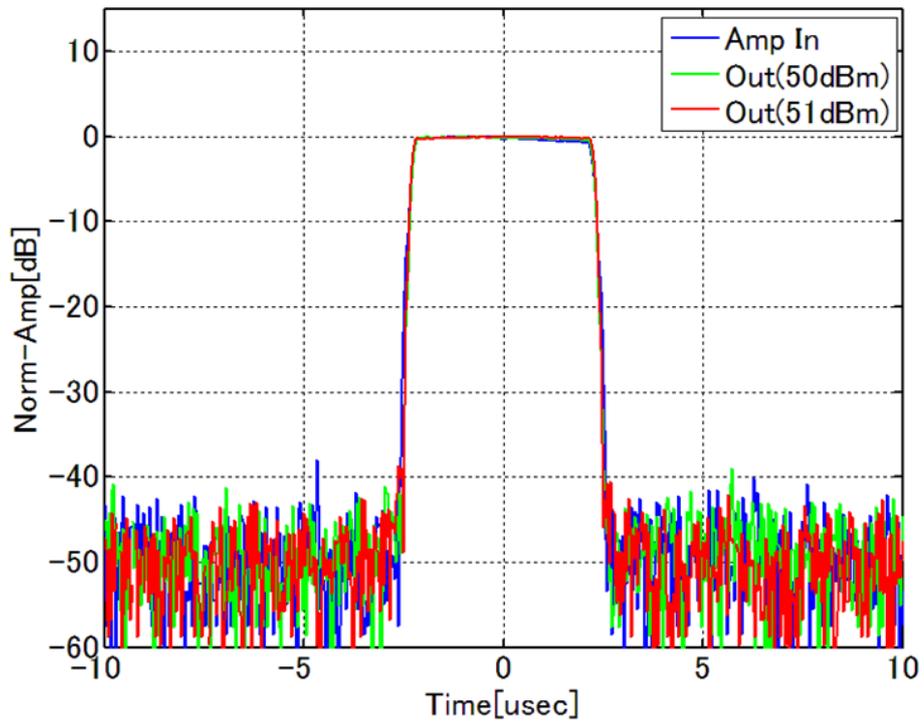
表 3-13 送信信号諸元

項目	設定値
中心周波数	9.41 GHz
パルス幅	4 μ s
周波数掃引幅	15 MHz
繰り返し周波数	600 Hz
立ち上がり, 立ち下がり時間	0.4 μ s

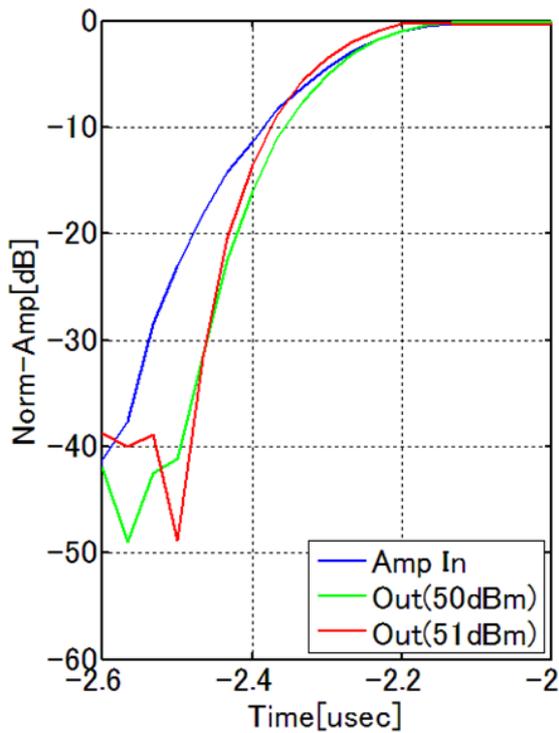
3-3-2 パルス波形歪とそのパルス圧縮への影響

パルス波形の測定結果を図 3-39 に示す. 図には出力波形として最大出力時 (51 dBm) と 50 dBm 出力時の 2 種を示し, 増幅器入力の波形も併記した. 各測定結果の差分を見易くするため, それぞれの最大振幅で正規化した結果を示している. 図より増幅器を介すことによって立ち上がり, 立ち下がりにおいて振幅の時間傾斜が大きくなっており, 最大出力時にはあたかもパルス幅が長くなったような挙動であることがわかる. 表 3-14 にはこれらの数値比較を示す. カッコ内の数値は増幅器入力に対する変化の割合を表す.

Time domain waveform



Rise characteristics



Fall Characteristics

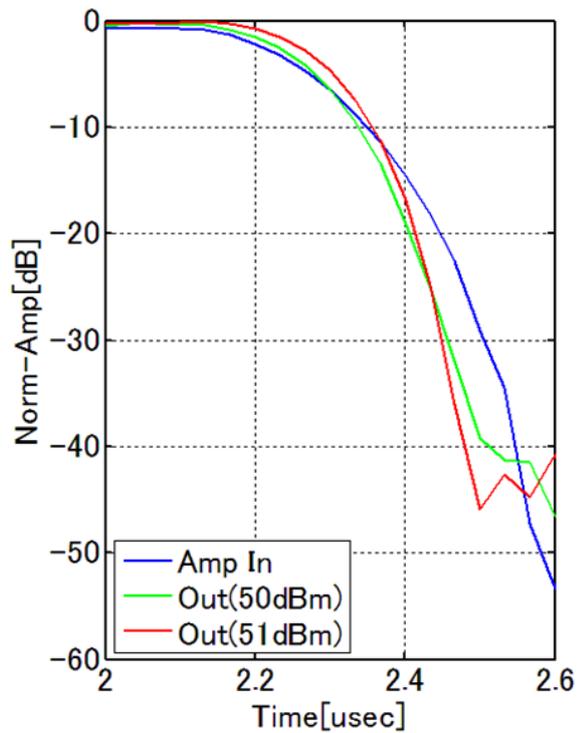


図 3-39 パルス信号の時間波形

(青：増幅器入力，緑：増幅器出力 (50 dBm 出力時)，赤：増幅器出力 (51 dBm 出力時))

表 3-14 パルス信号の時間特性比較

	Rise [dB/ μ s]	Fall [dB/ μ s]	Width [μ s]
Amp in	101.1	90	4.467
Out (50 dBm)	135.0 (+33.5 %)	135 (+50.0 %)	4.467 (0 %)
Out (51 dBm)	161.7 (+59.9 %)	161.7 (+79.6 %)	4.533 (+1.5 %)

図 3-39 の増幅器入力の実測値に図 3-37 の入出力特性の実測結果を当てはめ、立ち上がりにおける非線形性の影響を試算した結果を図 3-40 (左) に示す。非線形性の影響のみを考えた場合、出力電力に応じて振幅の時間傾斜が大きくなり、パルス幅が長く見える傾向はあるが、入力信号に対する遅延は見られない。一方遅延のみを考慮した場合には当然パルス幅の拡大のような現象は見られない。図 3-40 (右) には最大出力時における立ち上がりの実測結果を再掲したが、この挙動は増幅器の非線形性と過渡応答がともに影響したものであると考える。

図 3-41 には図 3-39 の信号にパルス圧縮を行った結果を示す。前述したパルス波形の歪はパルス圧縮の結果に SNR の劣化として現れ、非線形領域での動作範囲が大きくなるほどに劣化することがわかった。なおこのときのパルス圧縮には文献[3-14]を参考に、ミスマッチドフィルタを用いた。

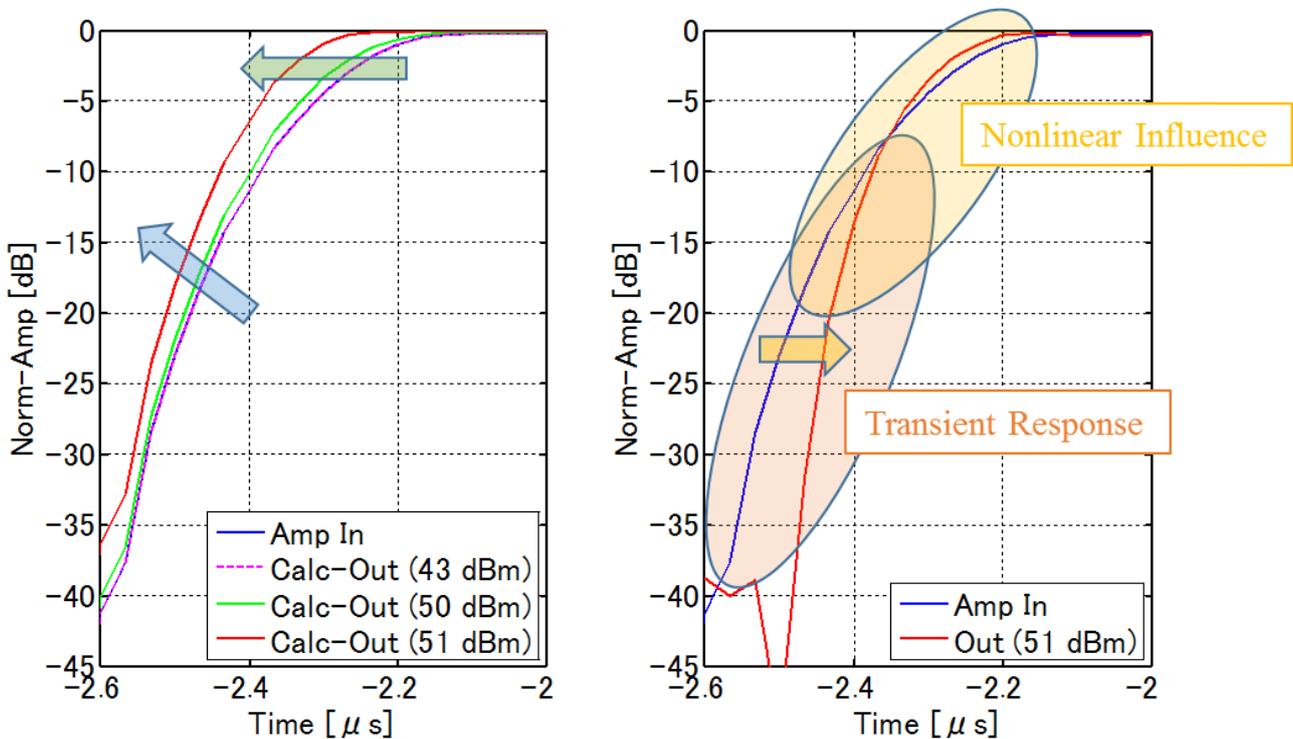


図 3-40 非線形性の試算結果 (左) と測定結果の考察 (右)

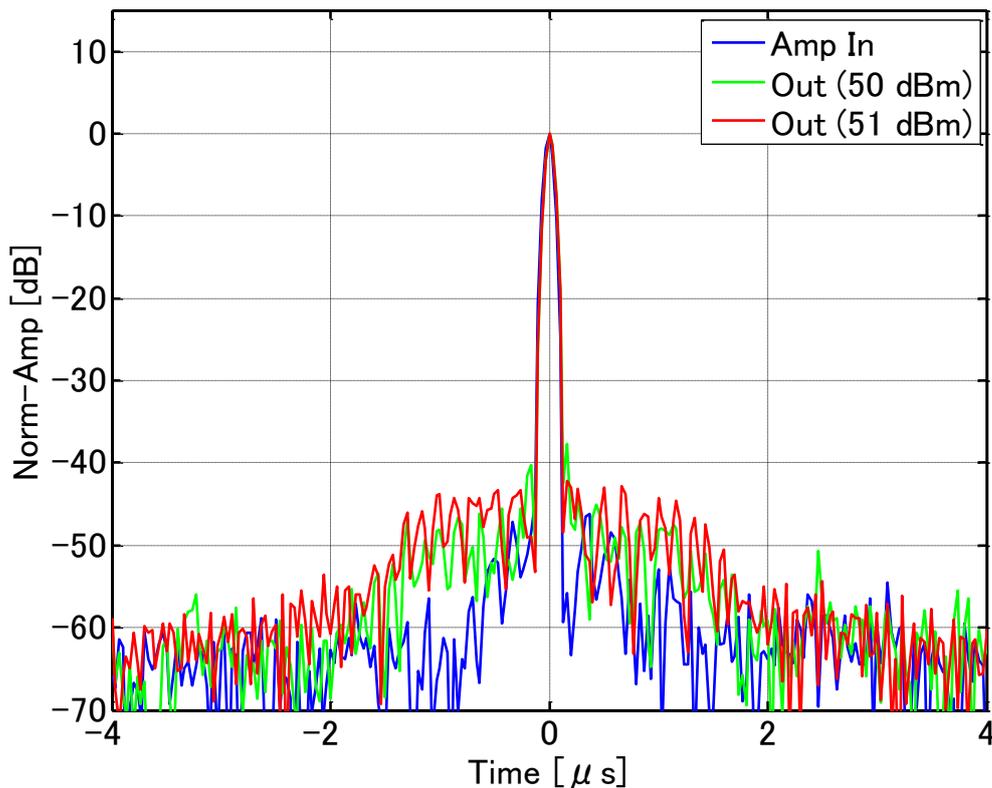


図 3-41 パルス圧縮後の時間波形

(青：増幅器入力，緑：増幅器出力（50 dBm 出力時），赤：増幅器出力（51 dBm 出力時）

3-3-3 パルス波形歪の低減手法提案

前節で示した波形歪の低減に関しては各種の補償手法が提案されており、大きくはフィードバック、フィードフォワード、プレディストーションの3種に分類される^[3-9]。このうちフィードバックとフィードフォワードは補償される増幅器で発生した歪そのものを使用して補償を行うことから比較的大きな歪低減量を得ることができるが、リアルタイムで増幅器自身の歪を利用するために何らかの付加回路を必要とする。回路追加を必要としないプレディストーションの一種として、予め歪信号を計測し、それを低減する信号を送信信号として増幅器に入力する手法も考えられるが、使用条件の事前計測との差異や複数台製作時の歪特性のばらつきなどを考慮した場合、歪低減量の低下もしくは事前計測の複雑化が懸念される。回路の追加を必要とせず、使用条件の差異などに影響を受けない歪低減手法が望まれる。

提案する手法では所望信号の前後に、後の信号処理で分離可能な信号（ダミー信号）を付加する。ダミー信号は所望信号の振幅に応じて振幅を変化させることで、所望信号送信中の出力電力を一定にするような振幅操作を行う。増幅器の歪はダミー信号の立ち上がりおよび立ち下がり部分にのみ現れ、これを受信側の信号処理で分離することにより所望の出力波形を得る。概念図を図 3-42 に示す。この手法では歪補償のために回路の追加を必要としない。また電氣的、熱的に安定した領域で所望信号を取り扱うため、信号諸元や周囲温度の変化に対して影響を受け難い。

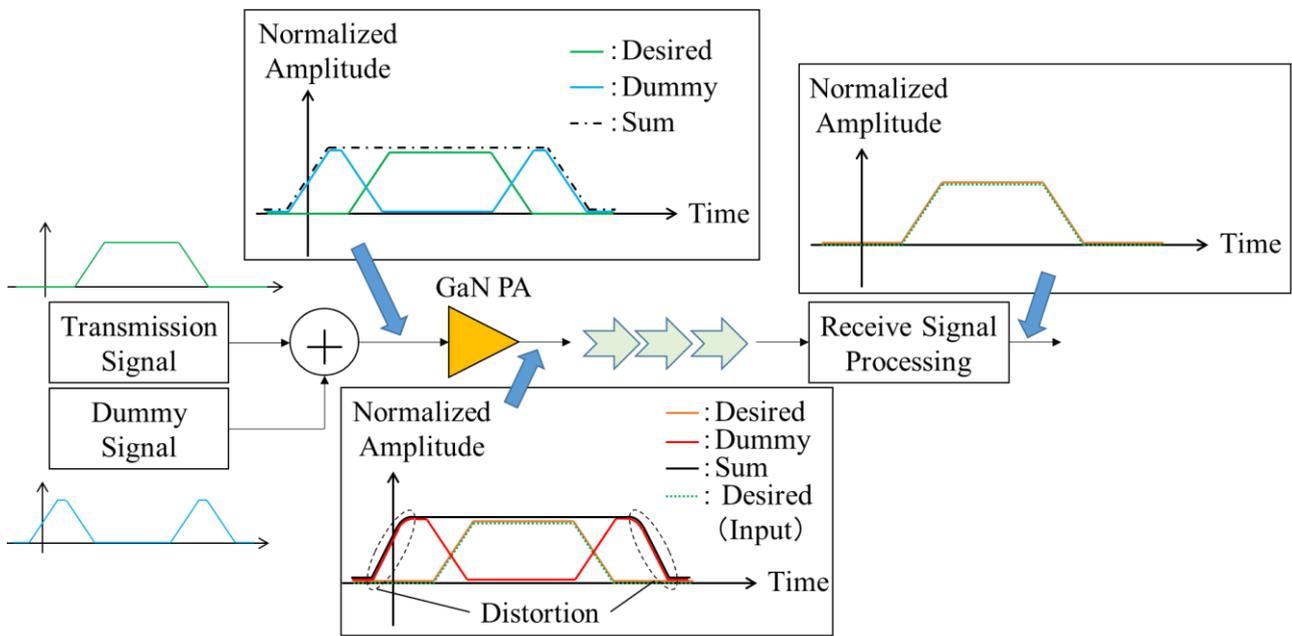
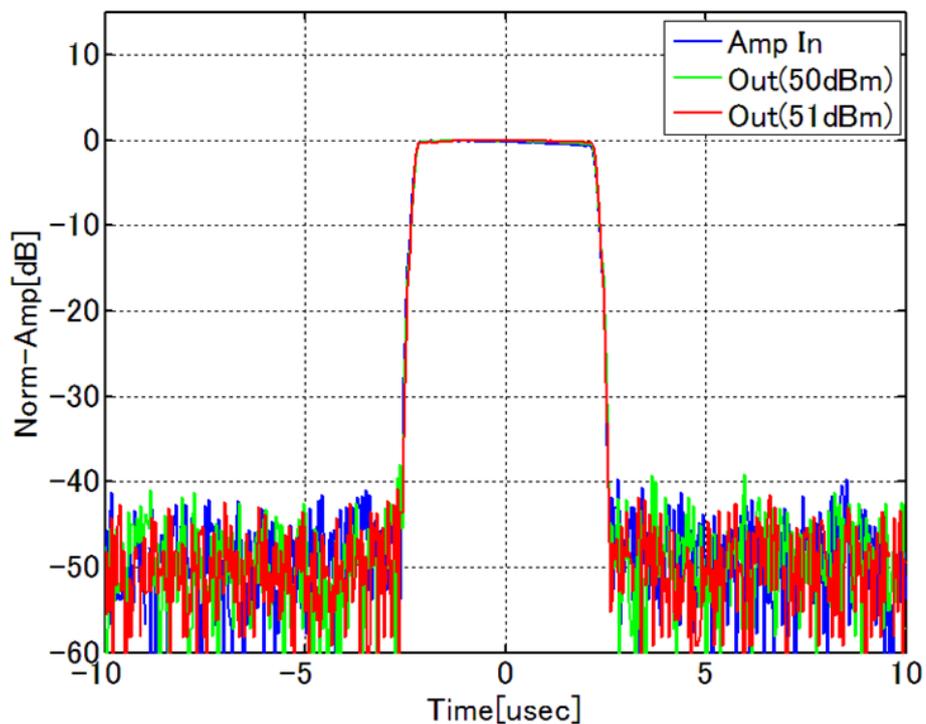


図 3-42 提案手法の概念図

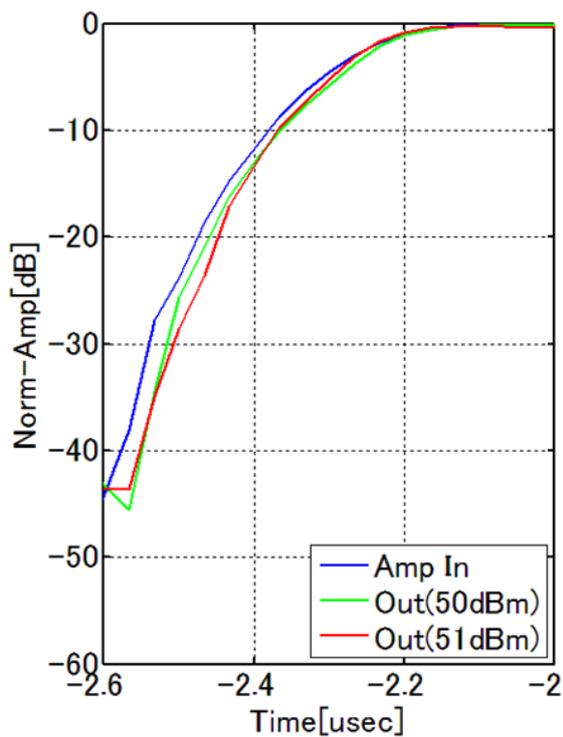
3-3-4 提案手法の効果の確認

3-3-1 節で示した増幅器に対し，提案手法を適用したときの実測結果を図 3-43 に示す．ここではダミー信号として所望信号と中心周波数が異なる無変調パルス信号を用い，受信側において帯域フィルタによりダミー信号を取り除いた．図 3-43 はダミー信号を除去した後の波形である．提案手法により増幅器入出力のパルス波形がよく一致していることがわかる．図 3-44 はこのパルス圧縮の結果である．提案手法により増幅器入出力間での特性差分が少なくなり，図 3-41 の結果に対して 5dB 程度の SNR の改善を得た．

Time domain waveform



Rise characteristics



Fall Characteristics

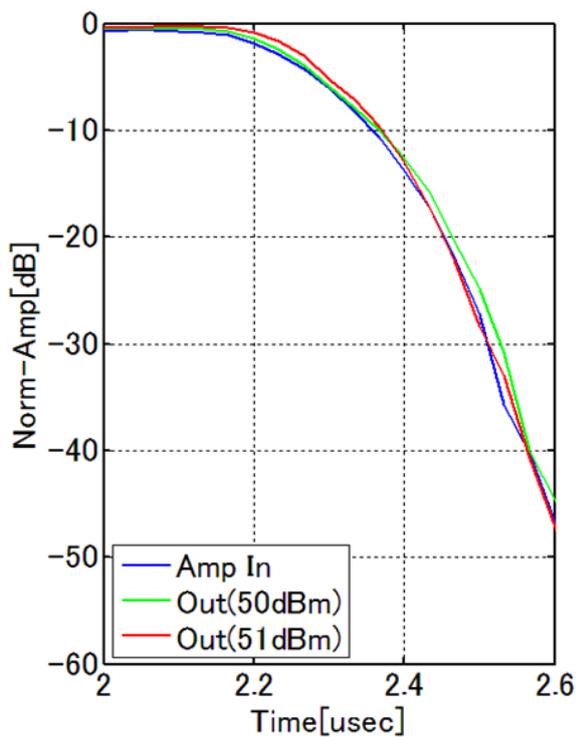


図 3-43 提案手法におけるパルス信号の時間波形

(青：増幅器入力，緑：増幅器出力 (50 dBm 出力時)，赤：増幅器出力 (51 dBm 出力時))

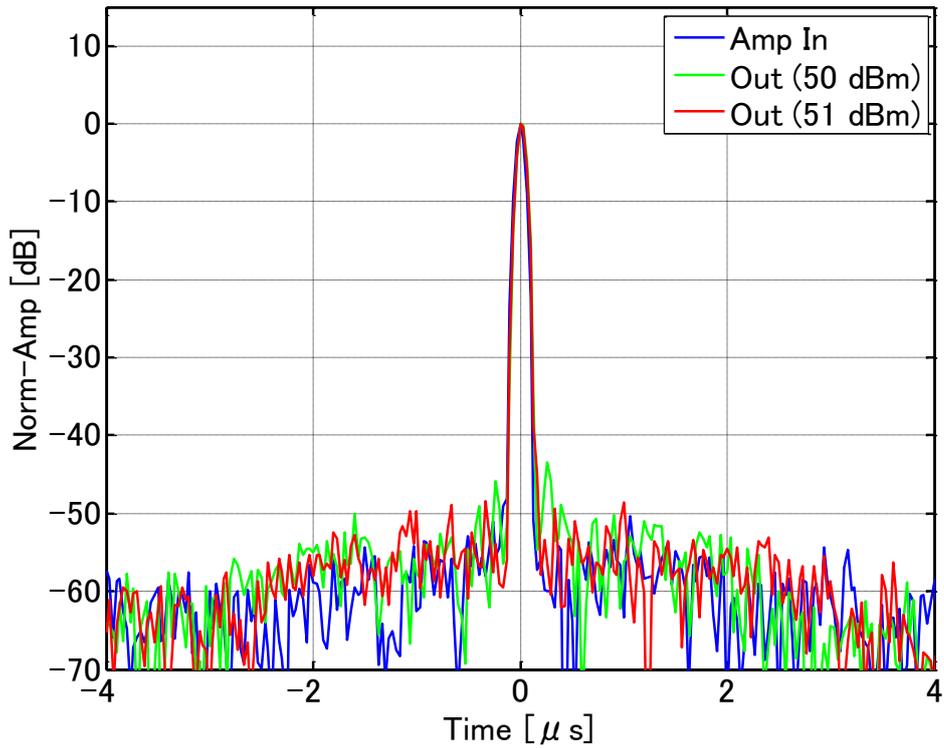


図 3-44 提案手法におけるパルス圧縮後の時間波形

(青：増幅器入力，緑：増幅器出力 (50 dBm 出力時)，赤：増幅器出力 (51 dBm 出力時))

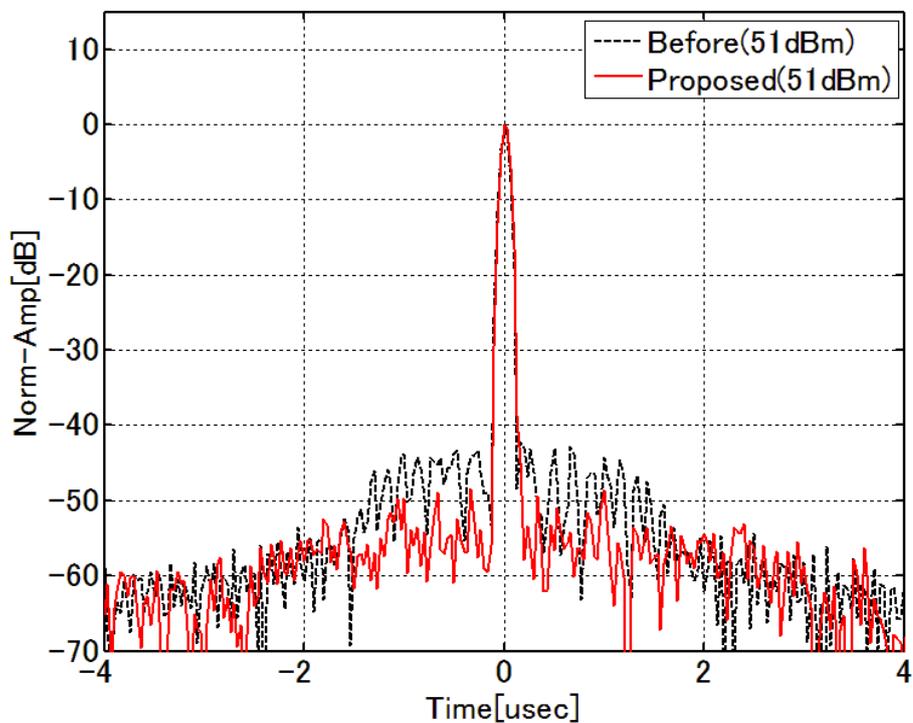


図 3-45 パルス圧縮後の時間波形比較

(黒：提案手法適用前 (51 dBm 出力時)，赤：提案手法適用後 (51 dBm 出力時))

3-4 文献

- [3-1] 須藤正則, 菅原博樹, 沢柳雅哉, 山縣純次: X 帯船舶レーダー用 400W GaN 固体化増幅器, 日本無線技報 No.55, 2008, pp. 25-28.
- [3-2] Wolfspeed 社ホームページ. Wolfspeed.
<https://www.wolfspeed.com/>, (2016 年 10 月参照)
- [3-3] Qorvo 社ホームページ. Qorvo.
<https://www.qorvo.com/>, (2016 年 10 月参照)
- [3-4] Y. Kobayashi, S. Yoshida, Z. Yamamoto, S. Kawasaki: S-band GaN on Si Based 1kW-Class SSPA System for Space Wireless Applications, IEICE Trans. Elec, Vol. 96-C, No. 10, pp. 1245-1253, Oct. 2013.
- [3-5] N. Hasegawa, N. Shinohara, S. Kawasaki: A 7.1 GHz 170 W Solid-State Power Amplifier with 20-Way Combiner for Space Applications, IEICE Trans. Elec, Vol. 99-C, No. 10, pp. 1140-1146, Oct. 2016.
- [3-6] F. Bertoluzza, G. Sozzi, N. Delmonte, and R. Menozzi, "Hybrid Large-Signal/Lumped-Element Electro-Thermal Modeling of GaN-HEMTs," IEEE Trans. Microwave, Vol. 57, No. 12, pp. 3163-3170.
- [3-7] Y. Deng, M. M. Islam, M. Gaevski, Z. Yang, V. Adivarahan, and A. Khan, "Determination of the Channel Temperature in GaN MOSHFETs under Microwave Operational Conditions," ISDRS 2007, December 2007.
- [3-8] Carlos G. Tua, Timothy Pratt, Amir I. Zaghloul: A Study of Interpulse Instability in Gallium Nitride Power Amplifiers in Multifunction Radars, IEEE. Trans Microwave, 2016, pp.3732-3747.
- [3-9] 中山正敏, 高木直: 電力増幅器の低歪み・高効率化の手法, MWE2005, 横浜, TL03-02, Nov. 2005.
- [3-10] 小林雄太: GaN HEMT を用いた宇宙環境耐性に優れた小型軽量高効率な次世代宇宙用電力増幅回路に関する研究, 総研大博士論文, 2013.
- [3-11] 伊藤康之, 高木直: MMIC 技術の基礎と応用, リアライズ理工センター, 1992.
- [3-12] Y. Kobayashi, S. Kawasaki: X-band, 15-W-Class, Highly Efficient Deep-Space GaN SSPA for PROCYON Mission, IEEE Trans. AERO, Vol. 52, No. 3, pp. 1340-1351.
- [3-13] 林大介, 荒田慎太郎, 森口幸男, 遠藤順人, 吉田賢史, 西川健二郎, 川崎繁男: Xバンド通信レーダー用低コストコンパクト高効率 GaN アンプの開発, 宇宙科学シンポジウム 2018, 神奈川, P-178, Jan.2018.
- [3-14] J. E. Cilliers, J. C. Smit: Pulse Compression Sidelobe Reduction by Minimization of Lp-Norms, IEEE Trans. AERO, Vol. 43, No. 3, pp. 1238-1247, July 2007.

第4章 高出力 GaN 増幅器を用いた X 帯パルス レーダの構築と搜索性能の実証

4-1 高出力 GaN 増幅器を用いた X 帯パルスレーダの構築

提案システムの実現性を実測ベースで実証するため、前章に示した高出力 GaN 増幅器を用い、X 帯パルスレーダを構築した。図 4-1 にブロック図を示す。試作したレーダはアンテナと送受信部より構成され、送受信部は高出力 GaN 増幅器と送受信機、およびサーキュレータより成る。送受信機は計測に関わる信号処理や外部機器との通信などを行う信号処理回路と送受の X 帯 RF 信号と IF 信号を変換する周波数コンバータにより構成される。

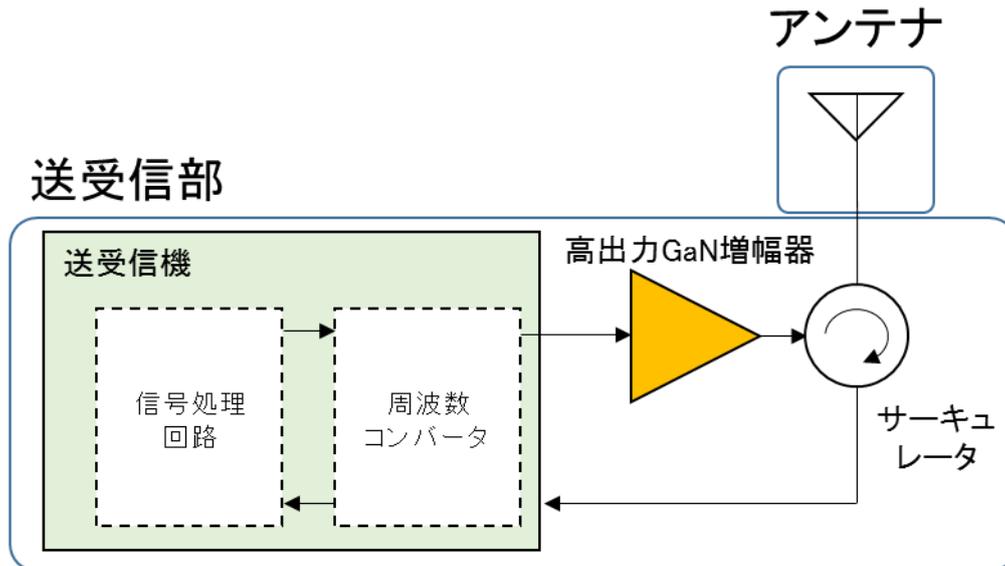


図 4-1 試作したレーダのブロック図

4-1-1 高出力 GaN 増幅器のモジュール化

前章で開発をした高出力 GaN 増幅器を用い、100 W 出力級のパワーアンプモジュールを構築した。ブロック図を図 4-2 に示す。最終段に 2 合成の GaN 増幅器、その前段のドライバアンプにベアチップ 1 つの GaN 増幅器を用いた。プリアンプには市販の GaAs MMIC を使用した。バイアスコントロール回路も内部に組み込むことで、外部からの 1 ビットの制御信号で各アンプのバイアス切替を行うことができる。

図 4-3 に試作したモジュールの内部構造を示す。モジュール化に当たっては増幅器の低コスト化のために周辺回路には比較的汎用的な基板 (FR-5 相当) と安価なアルミプレートを用いた。この熱シミュレーション結果を図 4-4 に示す。シミュレーションでは表 3-4 の試作評価結果 (60.3 W 出力で効率 32.1 %) から試作レーダにおけるデューティ比 (7 %) よりベアチップ 1 つの発熱量を 9 W と定義し、モジュール周辺の環境温度を 85°C、周囲空気の熱伝達係数を $5 \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K})$ と設定した。このときのジャンクション温度は 150°C 程度であり、レーダの使用環境温度の上限を 45°C と定義した場合、レーダの筐体内部で 40°C の温度上昇があった場合でもベアチップの仕様 (225°C) を満足することができる。図 4-5 には試作したモジュールの外観を表 4-1 には実測結果を示すが、周辺回路の使用材料を変更しても 100 W 増幅器の試作結果 (表 3-6) と比べて最大出力やドレイン効率など、遜色のない結果が得られた。

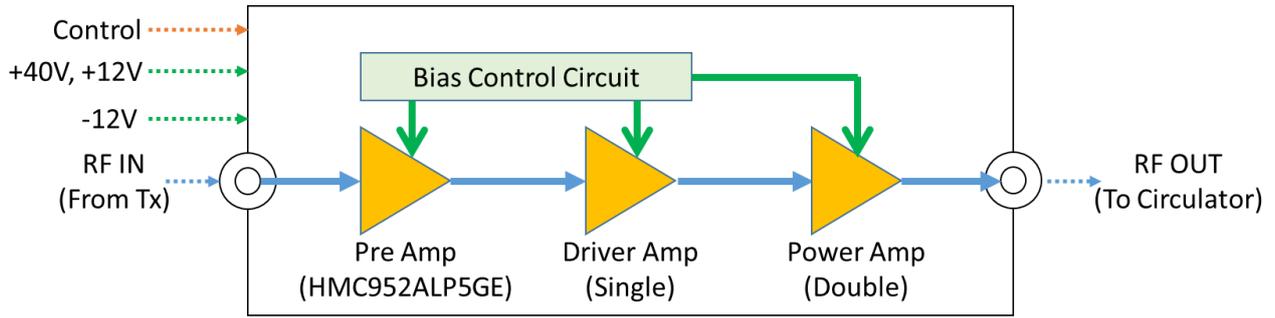


図 4-2 高出力 GaN 増幅器のブロック図

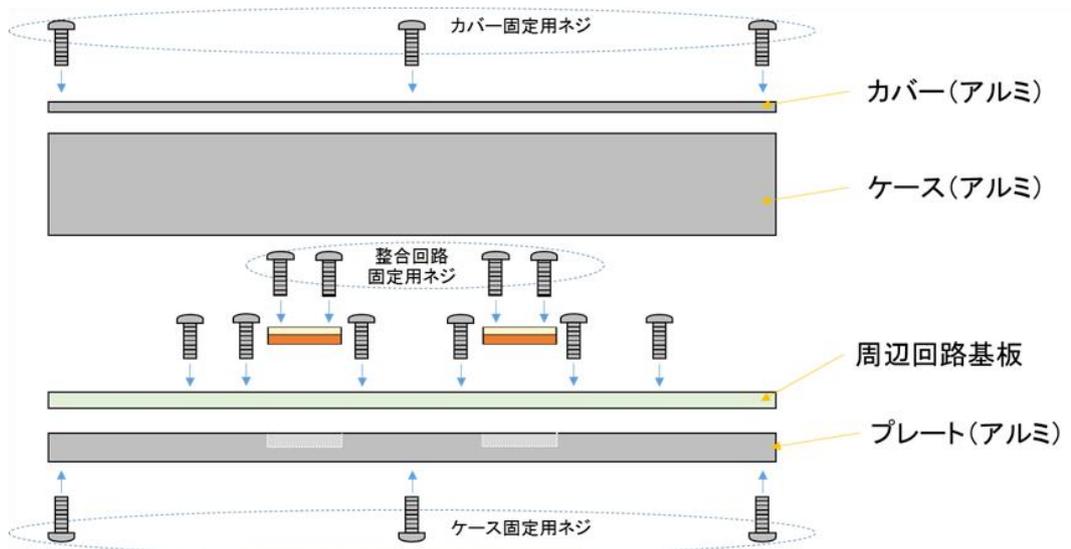


図 4-3 高出力 GaN 増幅器の内部構造

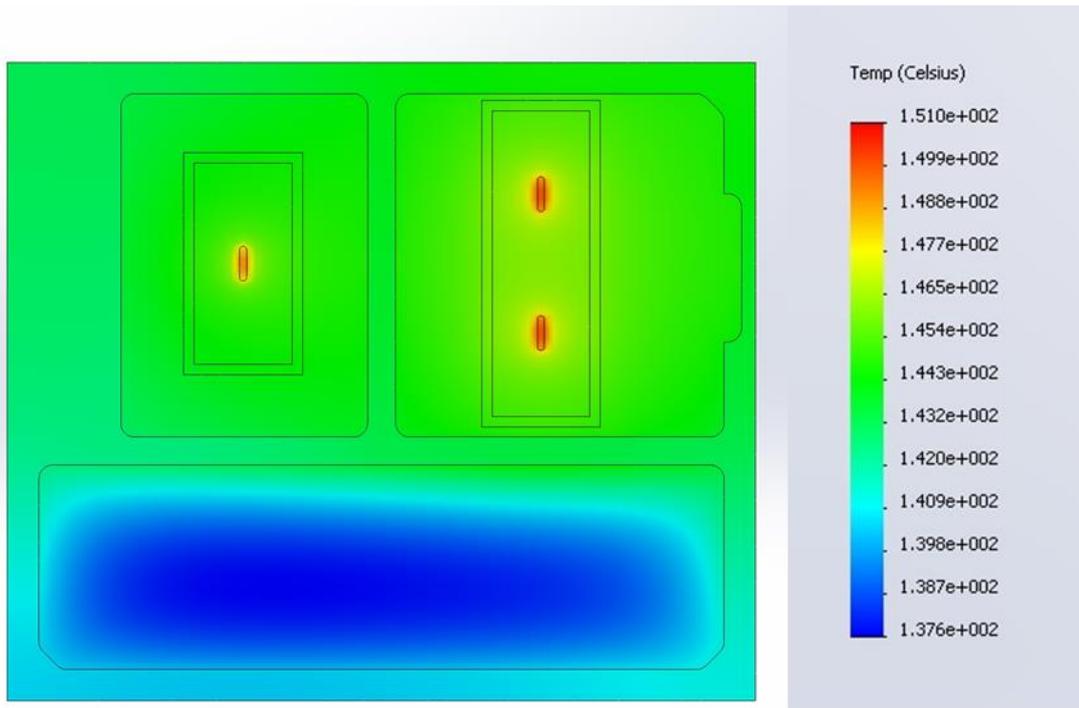


図 4-4 高出力 GaN 増幅器の熱シミュレーション結果



寸法 : 107 mm × 92 mm × 38.8 mm

図 4-5 高出力 GaN 増幅器の外観

表 4-1 高出力 GaN 増幅器の実測結果

	高出力 GaN 増幅器		
	9.3 GHz	9.4 GHz	9.5 GHz
最大出力	49.6 dBm (91.2 W)	50.1 dBm (102.3 W)	50.3 dBm (107.2 W)
利得	49.6 dB	51.1 dB	51.3 dB
ドレイン 効率	19.9 %	23.0 %	23.5 %

4-1-2 送受信機

送受信機を構成する周波数コンバータおよび信号処理回路のブロック図を図 4-6 に示す。送受信機では信号処理回路内の DAC により生成した 300 MHz 帯の IF 信号を 2 回の周波数変換を経て X 帯の RF 信号として増幅器に入力する。受信系統では、アンテナより受信された RF 信号を 40 MHz 帯の IF 信号に変換して信号処理回路内の ADC に入力する。PON, QON の 20 MHz の中心周波数差 (表 2-6) は信号処理回路により生成し、全体的な周波数帯の変更は周波数コンバータにより行う。周波数コンバータの受信系統には過大な送信信号の漏れ込みから回路を保護するためのリミッタとステップ ATT を挿入した。

信号処理回路では PON および QON 信号の生成と、検波・パルス圧縮処理を FPGA により行う。パルス圧縮処理には文献[4-1]を参考に mismatched filter (MMF) を用いた。パルス圧縮処理として一般によく知られている matched filter (MF) では送信信号そのものを用いてフィルタを設計するため、圧縮後の時間サイドローブが 13 dB 程度しか得られないことがわかっている^[4-2]。MMF (図 4-8) では希望とする応答 d (低サイドローブ) を定義し、送信信号 x をフィルタリングした結果 y と、その応答 d との差分が最小になるようフィルタを設計することでこの時間サイドローブを低減する。送受信機により生成した信号のスペクトラムと時間波形、および受信信号のパルス圧縮の様子を実測した結果を図 4-10 に示す。なお図 4-10 では表示器の都合上、圧縮後の振幅は正負を反転させて表示している。

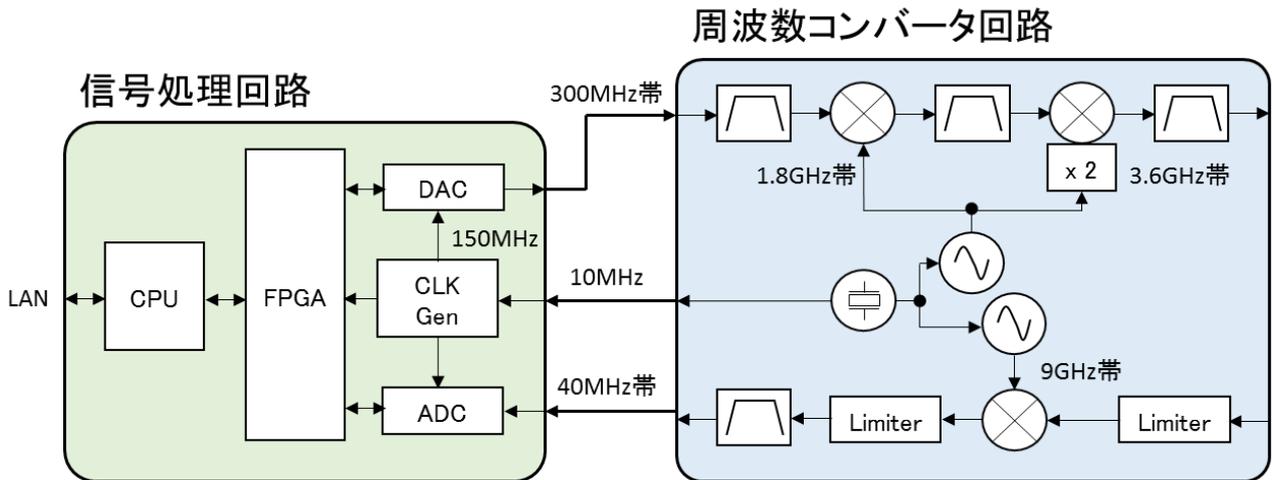


図 4-6 送受信機ブロック図

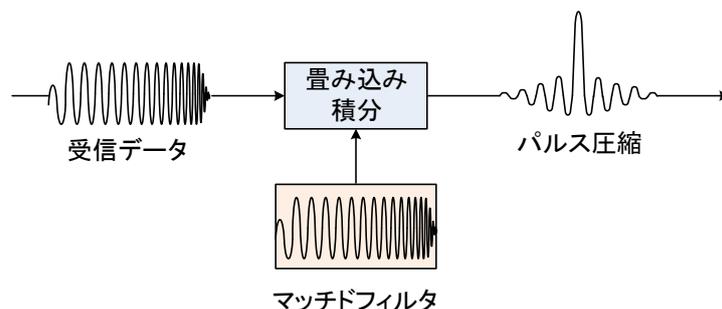


図 4-7 MF の処理ブロック図

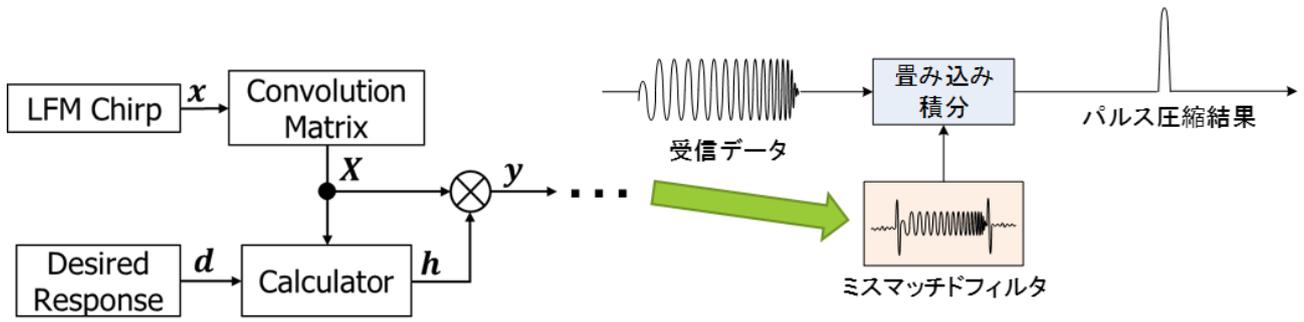


図 4-8 MMF の処理ブロック図

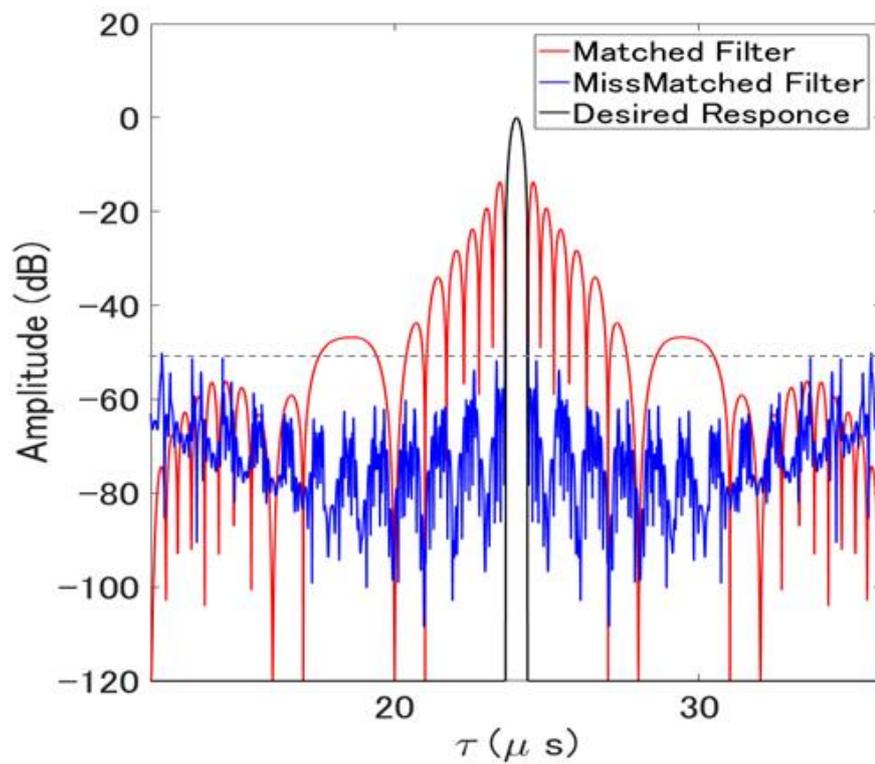


図 4-9 MF と MMF の時間サイドローブの比較

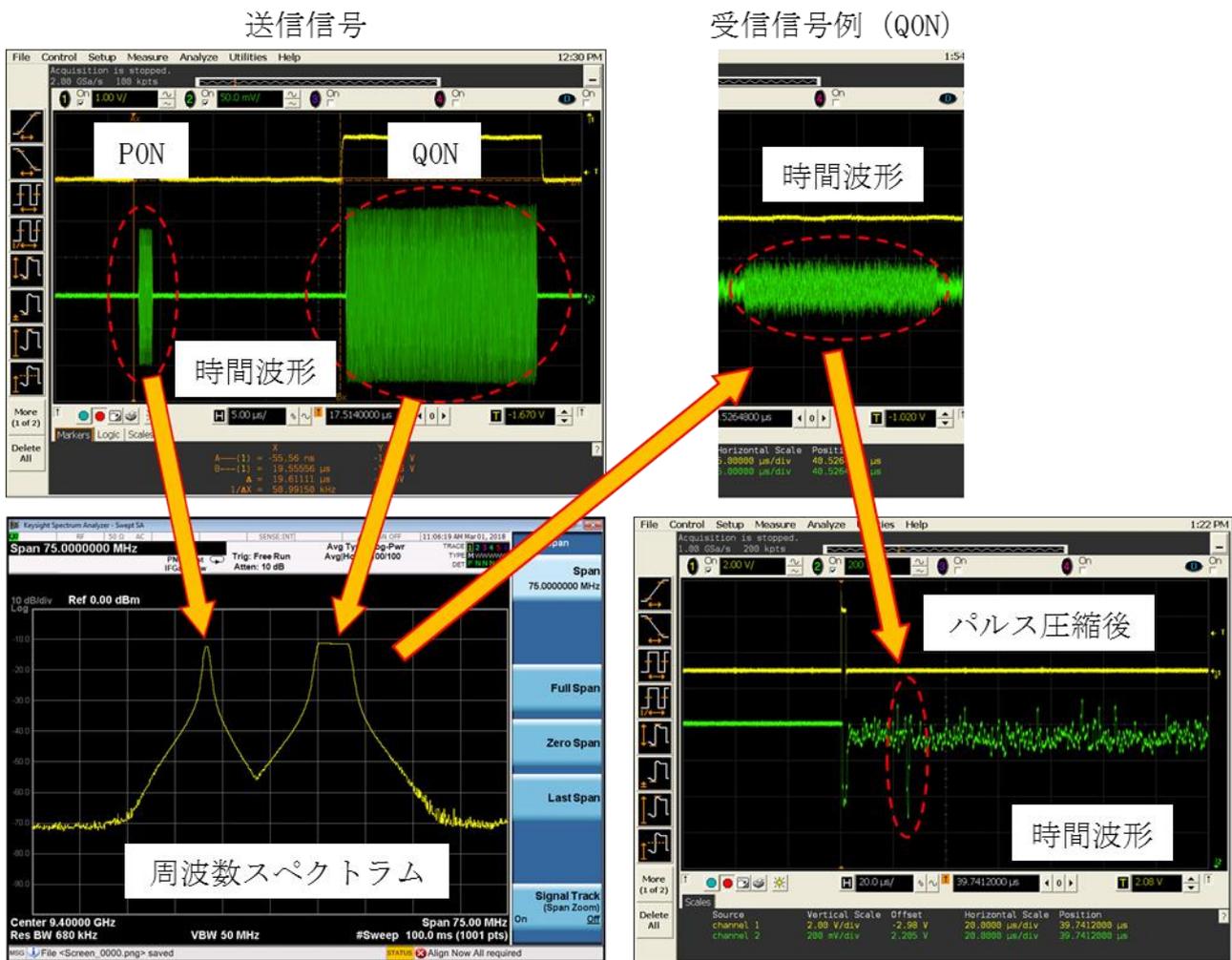
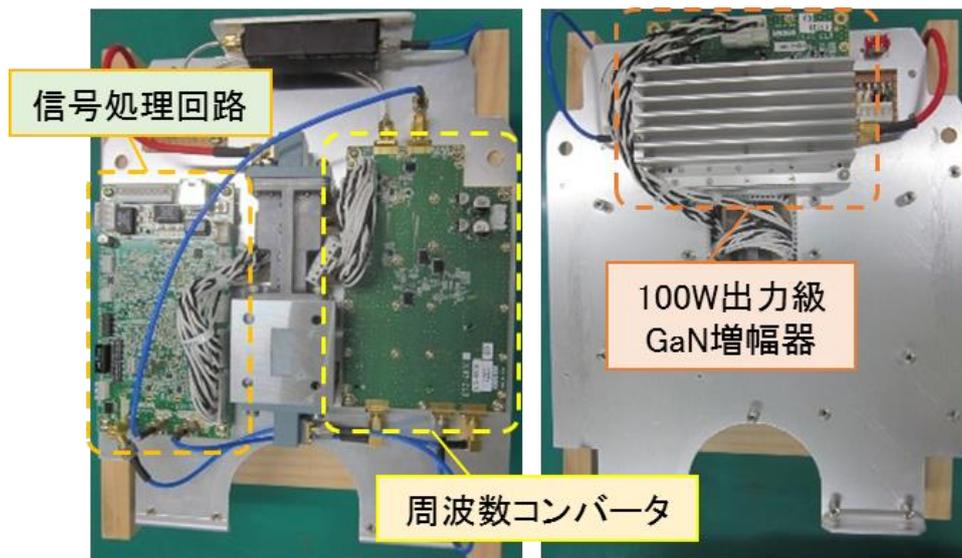


図 4-10 送信信号波形とパルス圧縮処理の実測結果

4-1-3 試作レーダの構築と受信特性

これまでに述べてきた高出力 GaN 増幅器モジュールと送受信機を組み合わせ、試作レーダを構築した。外観と内部構造を図 4-11 に示す。この受信特性は図 4-12 に示すように通常アンテナが取り付けられる箇所に受信特性測定治具を接続し、可変アッテネータ (ATT) で受信レベルを変化させながら測定した。結果を図 4-13 に示す。第 2 章における当初想定では T_s は 598 K であったが、受信系の信号損失低減を図ることができ、実測結果では 368 K であった。また図 4-14 には参考としてアンテナを含めた試作レーダ全体を用いて取得したレーダ画像を示した。



— 内部回路(上面) — — 内部回路(下面) —



— 組み込み後 —

図 4-11 試作レーダの外観と内部構造

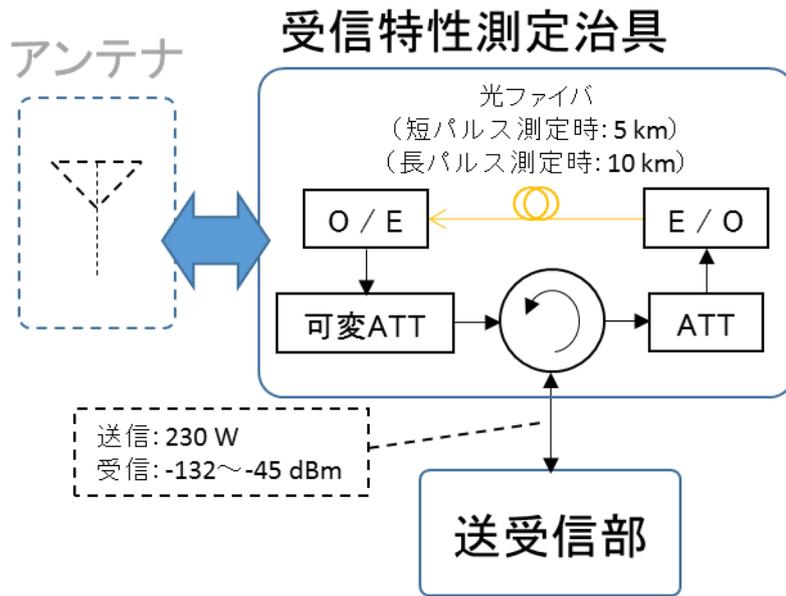


図 4-12 受信特性の測定系

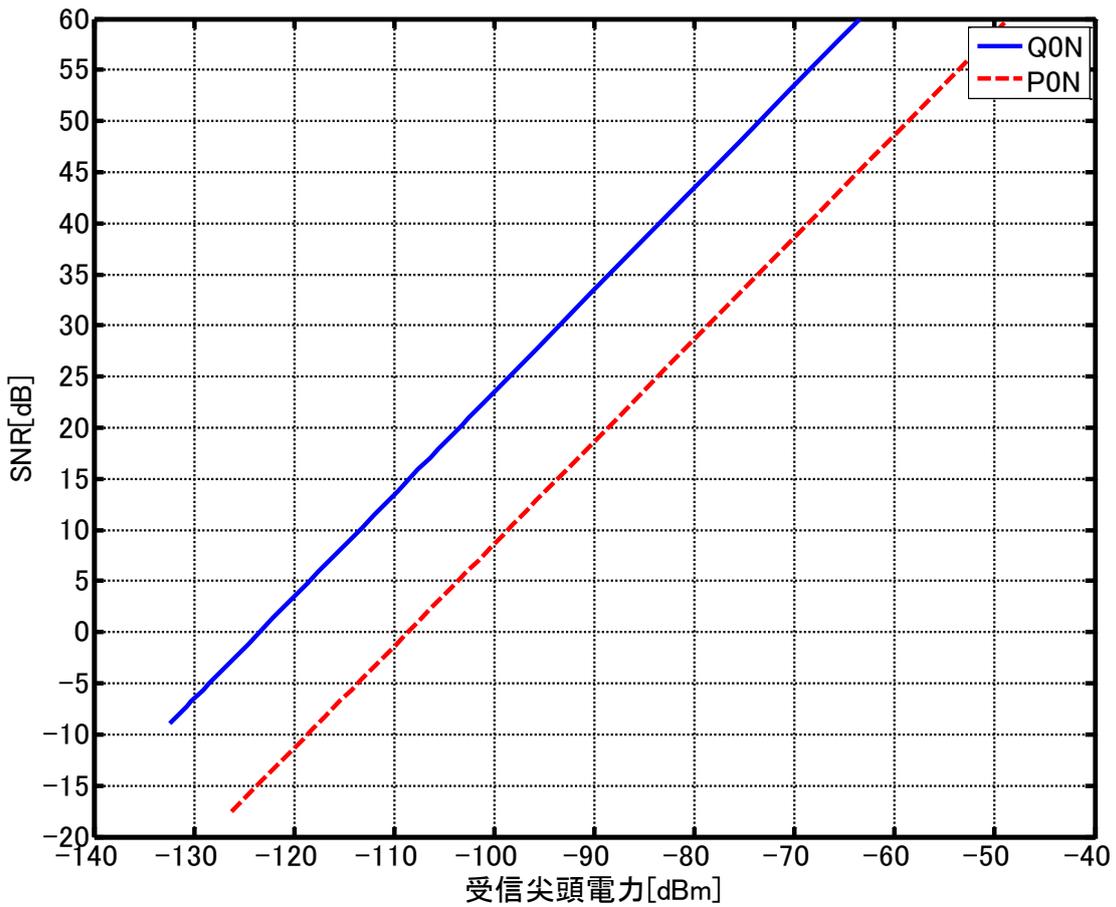


図 4-13 受信特性の測定結果

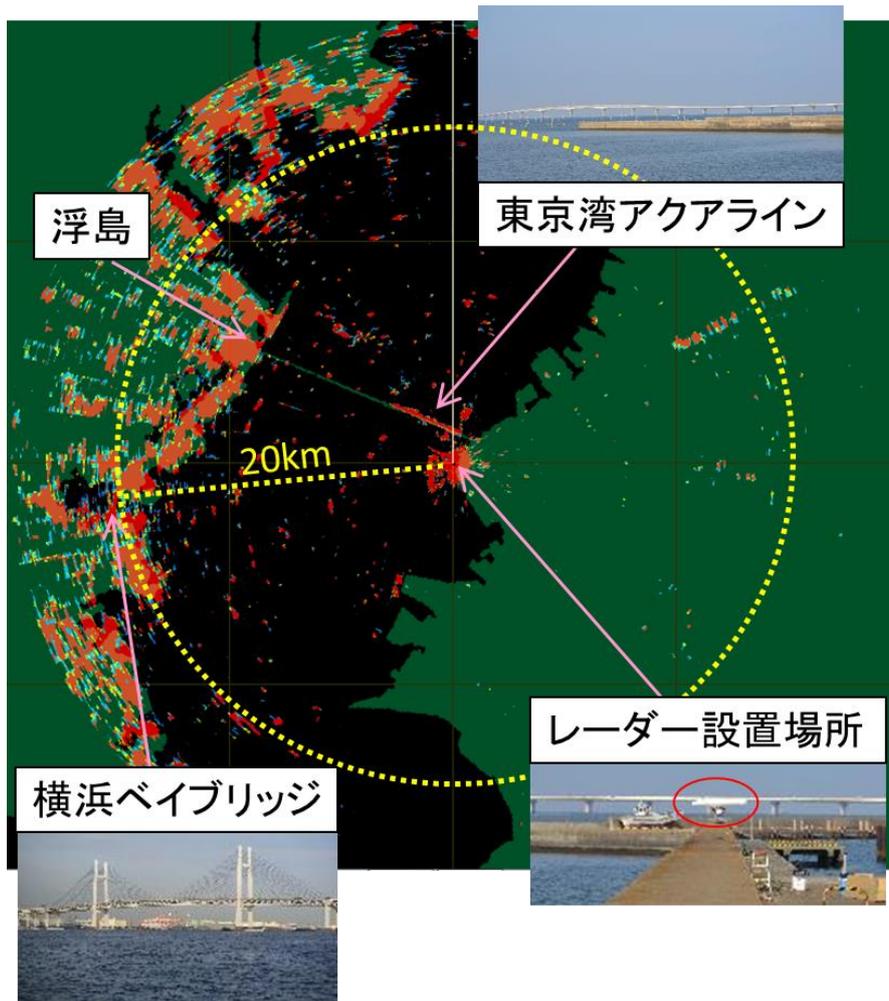


図 4-14 木更津海岸での実験結果

4-2 小型飛翔体を用いた遠距離探知試験による搜索性能の実証

4-2-1 試験用レーダの仕様

提案システムの妥当性を実測レベルで実証するために、内之浦宇宙空間観測所（Uchinoura Space Center, USC）において提案システムで想定する距離・高度における小型飛翔体の遠距離探知試験を実施した。試験に用いたレーダの仕様を表 4-2 に示す。かなり大規模な試験になることから確実に試験結果を得ることを目的として、前節の高出力 GaN 増幅器の出力にさらに市販の 250 W 級の増幅器を接続することで提案システムにより近い送信尖頭電力を設定し、アンテナ回転速度を極限まで抑えた値とした。このときのサンプル数 M は式(2-5)より 400 であり、ビジビリティファクタ V_0 は式(2-2)より検出確率 P_d を 0.9, 誤検出確率 P_f を 10^{-5} として -5 dB となる。遠距離探知を担う Q0N における $\text{SNR} = -5$ dB の受信尖頭電力は図 4-13 から -128.4 dBm となる。なおアンテナの諸性能は試験に供するアンテナを電波暗室において実測した値である。

表 4-2 試験用レーダの仕様

項目	提案システム	試験用レーダ
中心周波数	9390 MHz (P0N) 9410 MHz (Q0N)	9390 MHz (P0N) 9410 MHz (Q0N)
送信 尖頭電力	400 W	230 W
アンテナ	利得：30 dBi 以上 水平ビーム幅：0.8 deg 垂直ビーム幅：25 deg	利得：31.4 dBi 水平ビーム幅：0.8 deg 垂直ビーム幅：25 deg
電波の型式	P0N, Q0N	P0N, Q0N
パルス幅	P0N：1.2 μ s Q0N：22 μ s	P0N：1.2 μ s Q0N：22 μ s
繰り返し 周波数	3000 Hz	3000 Hz
アンテナ 回転速度	6 rpm	1 rpm

4-2-2 試験内容

遠距離探知試験を行った USC 内での器材配置を図 4-15 に示す。試験はゴム気球に吊り下げた検定球を KS センターから放球し、それをイプシロン支援センター (Epsilon Support Center, ESC) の屋上に配置した試験用レーダ、およびロケット追尾用の宮原精測レーダ (Miyabaru Precision Radar, MYPR) で同時に探知することにより行った。検定球は発泡スチロール球にアルミ蒸着フィルムを貼り付けたものであり、直径は 450 mm である (図 4-16)。単純球体のレーダ断面積はその半径を a としたとき式(4-1)で定義されており^[4-2]、検定球のレーダ断面積は 0.159 m^2 となる。これはカプセルのパラシュートに取り付けられた反射材のレーダ断面積に相当する^[4-3]。

$$\sigma = \pi a^2 \quad (4-1)$$

MYPR の測定結果との比較により試験用レーダの測定結果を考察する。放球場所と試験用レーダの直線距離は 2.5 km であり、試験用レーダと MYPR の距離は 271 m、高低差は 17 m であった。試験用レーダは事前試験により気球の飛翔方向として想定した 45~105 deg の搜索範囲でアンテナを往復動作させた。試験時の風速は 3.5 m/s、1 時間当たりの日照時間は 10 分であり、風向きにより気球が内陸方向に飛翔しないことを確認した上で放球を行った。

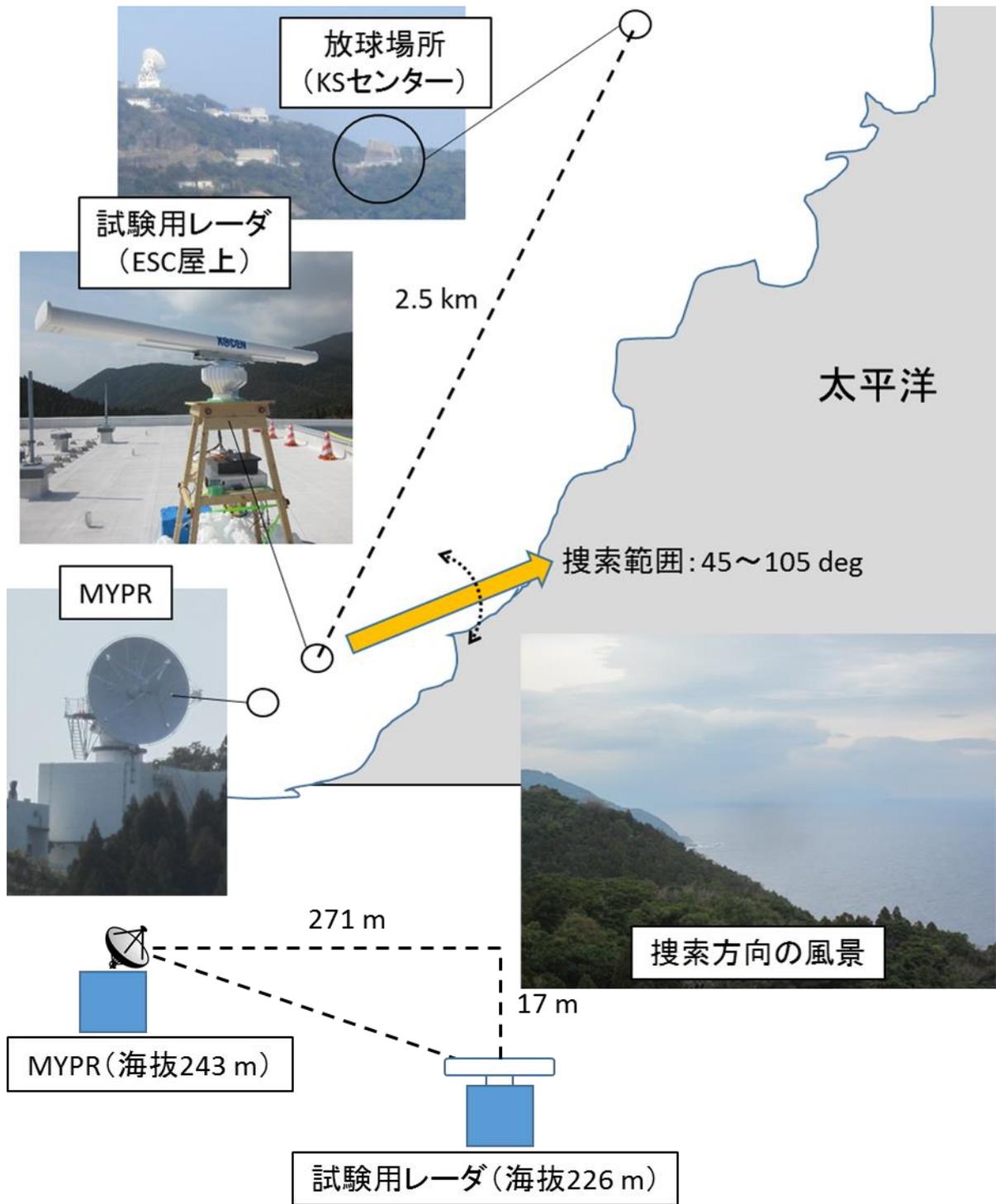


図 4-15 USC における遠距離探知試験の器材配置

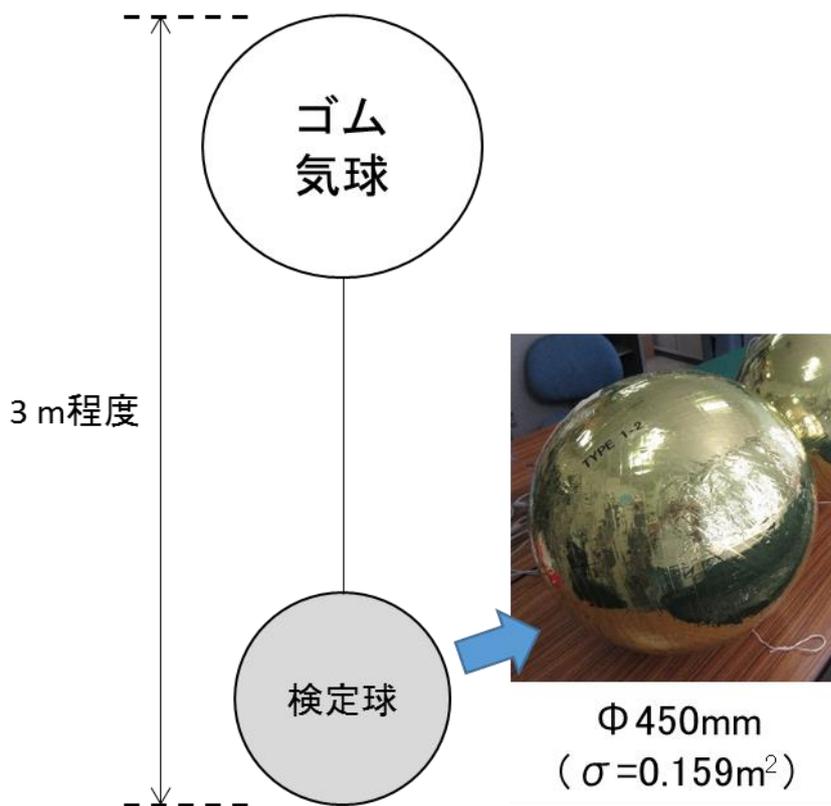


図 4-16 検定球の吊り下げの様子と外観写真

4-2-3 試験結果

図 4-17 に試験用レーダの測定結果の一例を示す。試験用レーダではアンテナの走査に合わせて画面を更新し、同一回転方向で全搜索範囲を更新し終えた際の描画結果を 1 面として定義する。横軸は方位角、縦軸は直線距離であり、色調によって受信信号強度 (dBm) を表す。近距離 (5.4 km 未満) と遠距離 (5.4 km 以上) で背景色が異なるのはパルス圧縮処理の有無により受信感度が異なるためである。

測定結果には船舶や対岸からの反射波 (点線) に加え、離散的な環境雑音 (破線) や広範な環境雑音 (一転鎖線) が含まれる結果となった。環境雑音は多少の強度や存在位置の差異はあったが、試験中常に存在した。これはレーダ設置箇所の海拔が高いことに起因したと考え、実際の運用においては問題にならないことを想定するが、詳細は 4-3-1 節において考察する。なお船舶の反射波が距離方向に大きく伸びているのはパルス圧縮処理における時間サイドローブによる^[4-1]。サイドローブは 4-1-2 節で述べた MMF による低減を図っているが、レーダ断面積の大きな物標に対してはパルス圧縮の後にさらなる低減処置が必要となる。本試験では非常に小さな信号を受信することが想定されたため、時間サイドローブ除去を含め、STC (Sensitivity Time Control) や CFAR (Constant False Alarm Rate)^[4-2] など感度を損ない得る雑音除去に類する信号処理はすべて施さずにデータ取得を行った。

図 4-18 は試験用レーダの測定結果に水平面の気球の軌跡を重畳した結果である。気球はまず距離 2.5 km を保ちながら方位角 70 deg 付近まで移動 (①) し、その後少しずつ距離を伸ばしながら 90 deg 付近まで移動 (②)、以降は方位角 90 deg 付近のまま距離を伸ばした (③)。

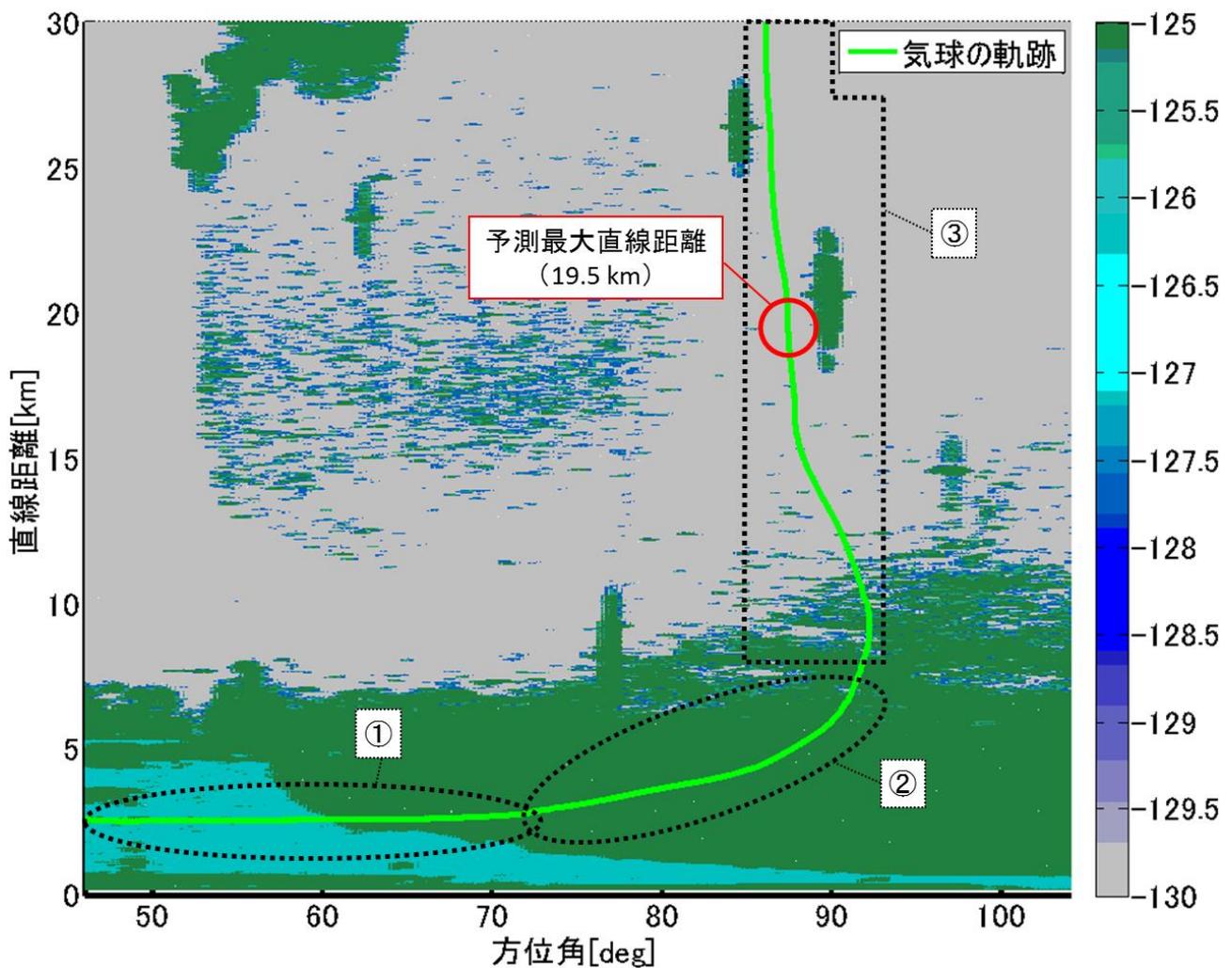


図 4-18 遠距離探知試験の結果例（気球の軌跡を重畳）

図 4-19 には横軸を水平距離，縦軸を高度としたときの気球の軌跡を示す．図中の破線は試験用レーダの垂直断面に対する探知性能の予測結果である．これは使用したアンテナの垂直面指向性パターンの実測結果から，エラー！参照元が見つかりません。節で述べた受信尖頭電力の下限値（= -128.4 dBm）となる水平距離および高度を計算した結果である．試験用レーダとしてはアンテナの最大利得点における水平距離 20.75 km，高度 1.8 km，直線距離 20.83 km が予測最大探知距離であったが，気球の軌跡を考慮した場合，本試験において確認し得る探知性能は水平距離 19.26 km，高度 3.4 km，直線距離 19.5 km となり，これらを図 4-18，図 4-19 に赤い丸印で示した．

受信尖頭電力の実測結果を図 4-20 に示す．併せて示した「計算値」は気球の軌跡から式(4-2)により計算した受信尖頭電力の値である．実測値は計算値と良く一致しており，最大では 17.5 km もの遠距離での探知に成功した．このときの水平距離は 17.2 km，高度は 3.3 km である．また 12.5 km 以降，16 km までは毎回の検索（1 面ごとの描画結果）で常に結果が得られており，高い検出確率で探知ができていたものとする．しかし実測値と計算値には表 4-3 に示すような誤差が生じ，予想最大距離である 19.5 km での探知は確認できなかった．この差分が生じた原因としては機器による計測誤差や温度などの環境条件，もしくは検定球の形状や姿勢に伴うレーダ断面積のわずかな変動があったものと推測する．実際に MYPR の測定結果においても $\pm 1 \sim 2$ dB 程度の受信電力の変動があった．

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 L_s}$$

(4-2)

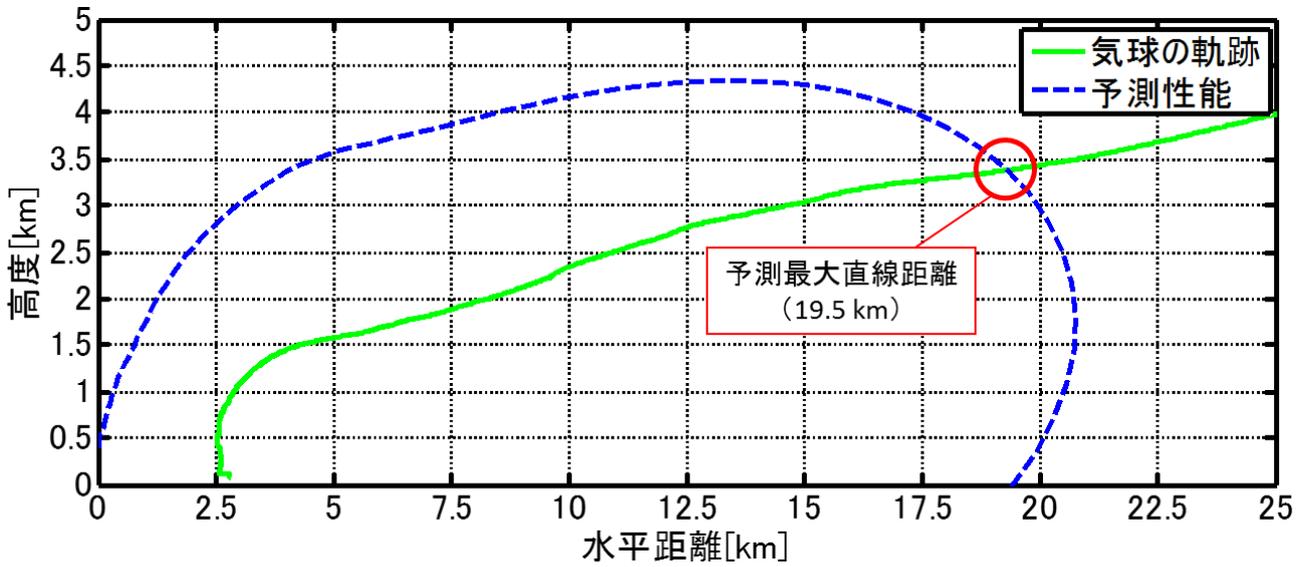


図 4-19 垂直断面の気球の軌跡と試験用レーダの予測性能

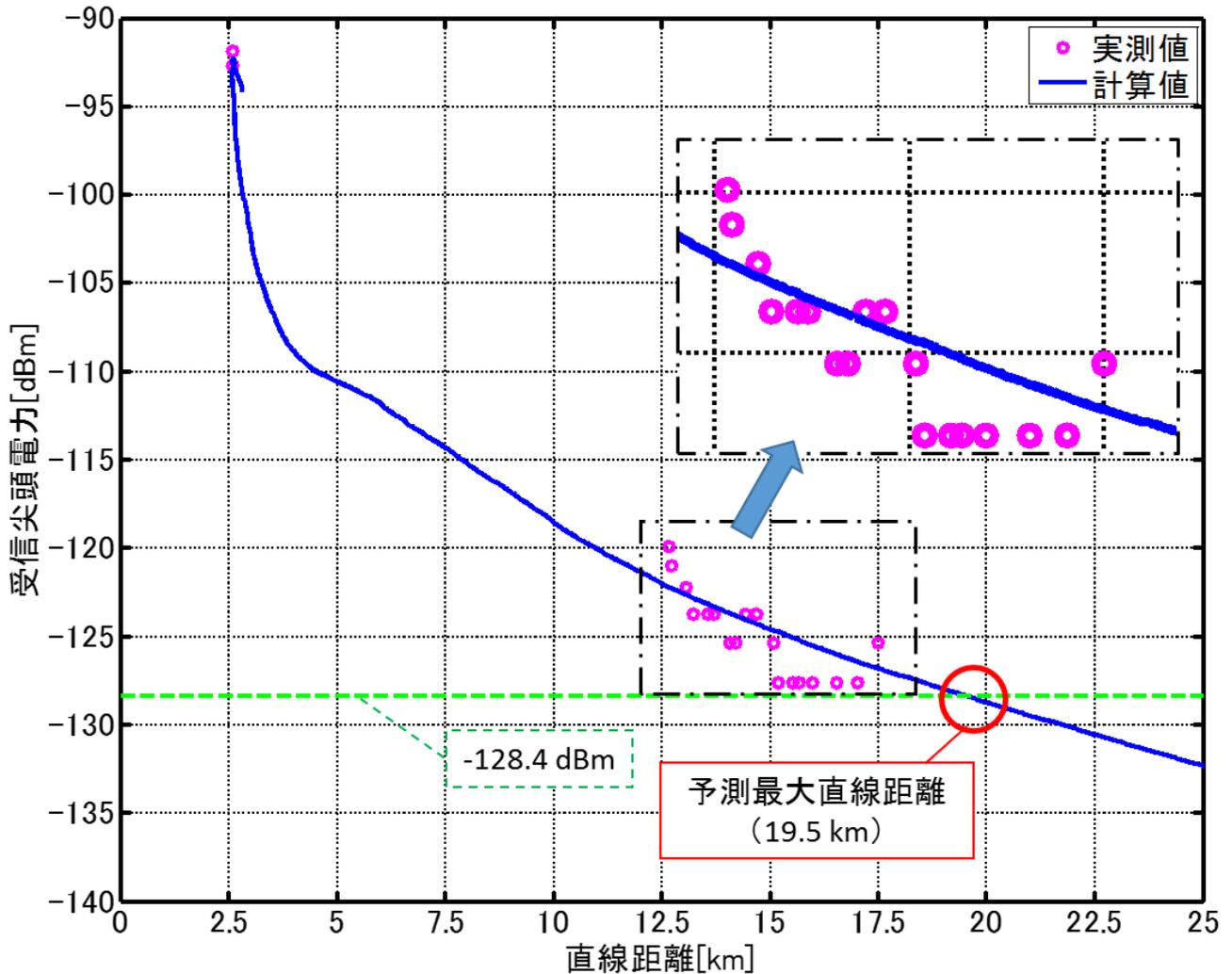


図 4-20 受信尖頭電力の実測結果

表 4-3 実測値と計算値の差分整理

	計算値との差分
最大	2.3 dB
平均	-0.5 dB
最小	-2.9 dB

4-2-4 搜索性能の実証

本節では前節の遠距離探知試験の結果を基に、提案システムの搜索性能に関する実証を行う。搜索性能としては探知距離性能、検出回数および検出距離分解能を対象とした。

4-2-4-1 探知距離性能

遠距離探知試験では送信尖頭電力 P_t を 230 W，アンテナ回転速度 ω を 1 rpm として測定を行ったが、提案システムではこれらをそれぞれ 400 W，6 rpm に設定する。このときの垂直断面における探知距離性能を、表 4-3 の結果から計算値に対して最大 3 dB の劣化を考慮して算出した結果を図 4-21 に示す。ただしここではアンテナの実測結果から、より高高度からの探知を実現するために当初想定に対してアンテナを 5 deg 高高度方向に傾けることを想定した。表 4-4 にはこの結果と 2-3 節において定義したレーダの配置ルールを用いて、はやぶさなどの搜索範囲実績に対して求めた搜索範囲のカバー率を示す。表中のカッコ内の数値は当初想定値であるが、受信系の信号損失低減等による改善が見られ、400 W 出力化を果たすことにより、いずれの探査ミッションにおいても高度 3 km 以下においてすべての搜索範囲で探知が可能となることがわかった。

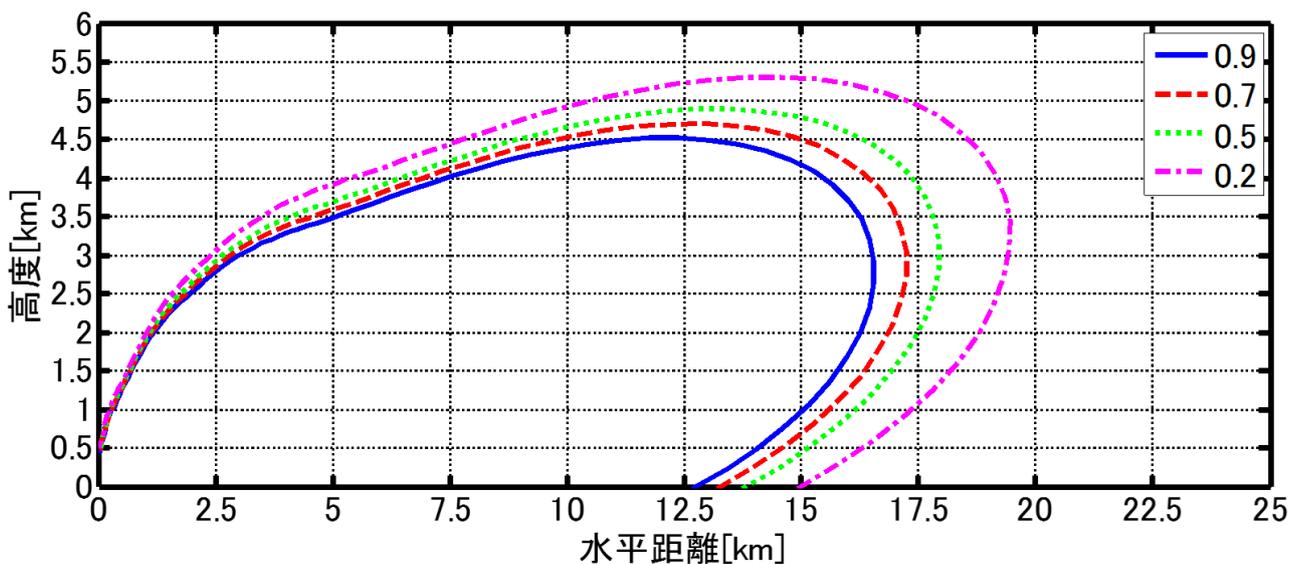


図 4-21 提案システムにおける垂直断面の探知距離性能
($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $E_l = 15 \text{ deg}$, $P_r = 10^{-5}$)

表 4-4 試験結果を基にした各探査ミッションの実績に対する搜索範囲のカバー率

高度	はやぶさ 40 km × 3 km	STARDUST 38.1 km × 8.2 km	GENESIS 41.9 km × 21.2 km
3 km	100 % (100 %)	100 % (100 %)	100 % (96.8 %)
2 km	100 % (100 %)	100 % (100 %)	100 % (100 %)
1 km	100 % (100 %)	100 % (99.8 %)	100 % (100 %)
0.5km	100 % (100 %)	100 % (98.1 %)	100 % (99.6 %)

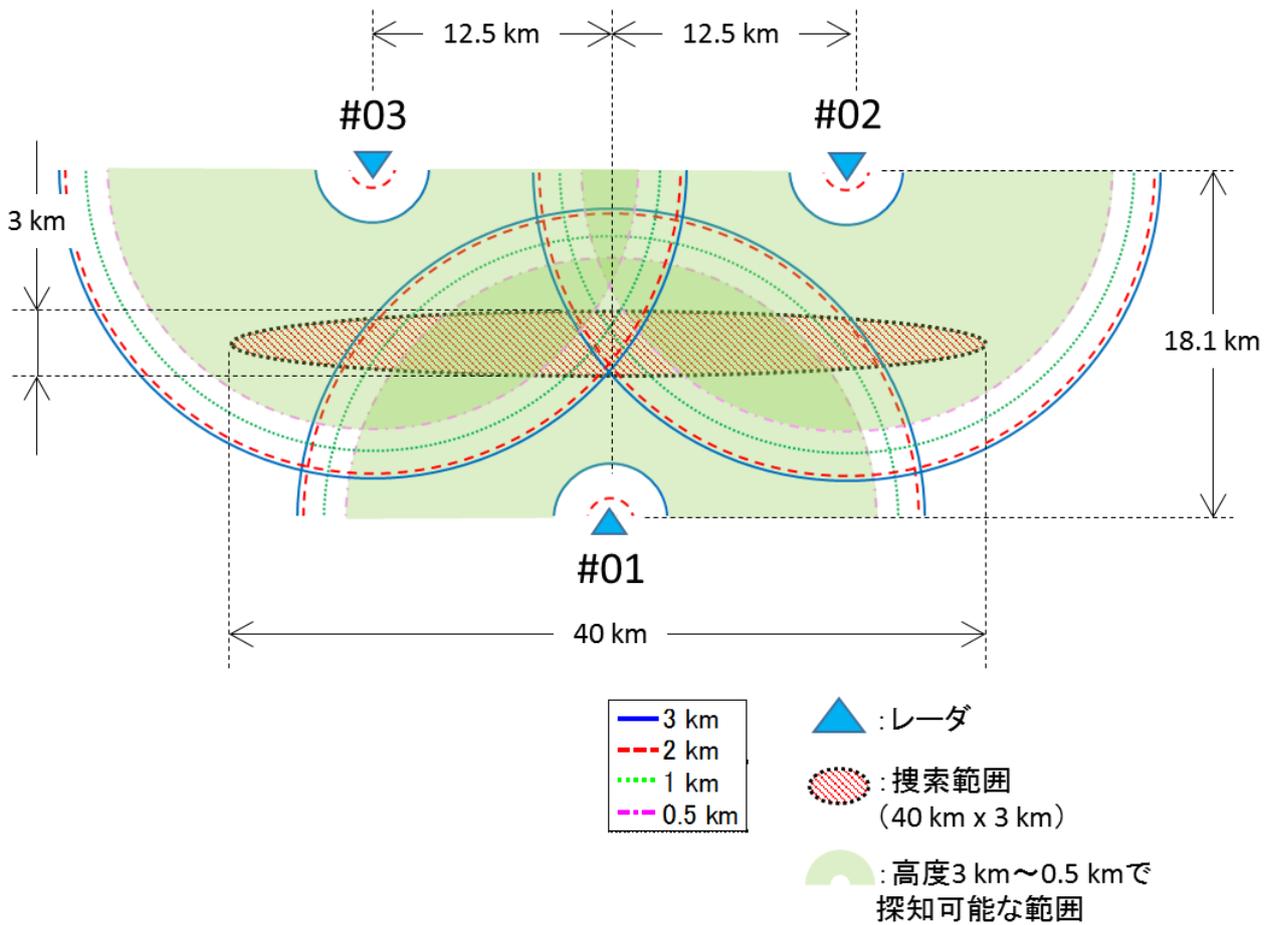


図 4-22 実測結果を基にしたはやぶさ実績に対する搜索範囲性能
($\sigma = 0.2 \text{ m}^2$, $P_d = 0.9$, $P_f = 10^{-5}$, $E_t = 15 \text{ deg}$)

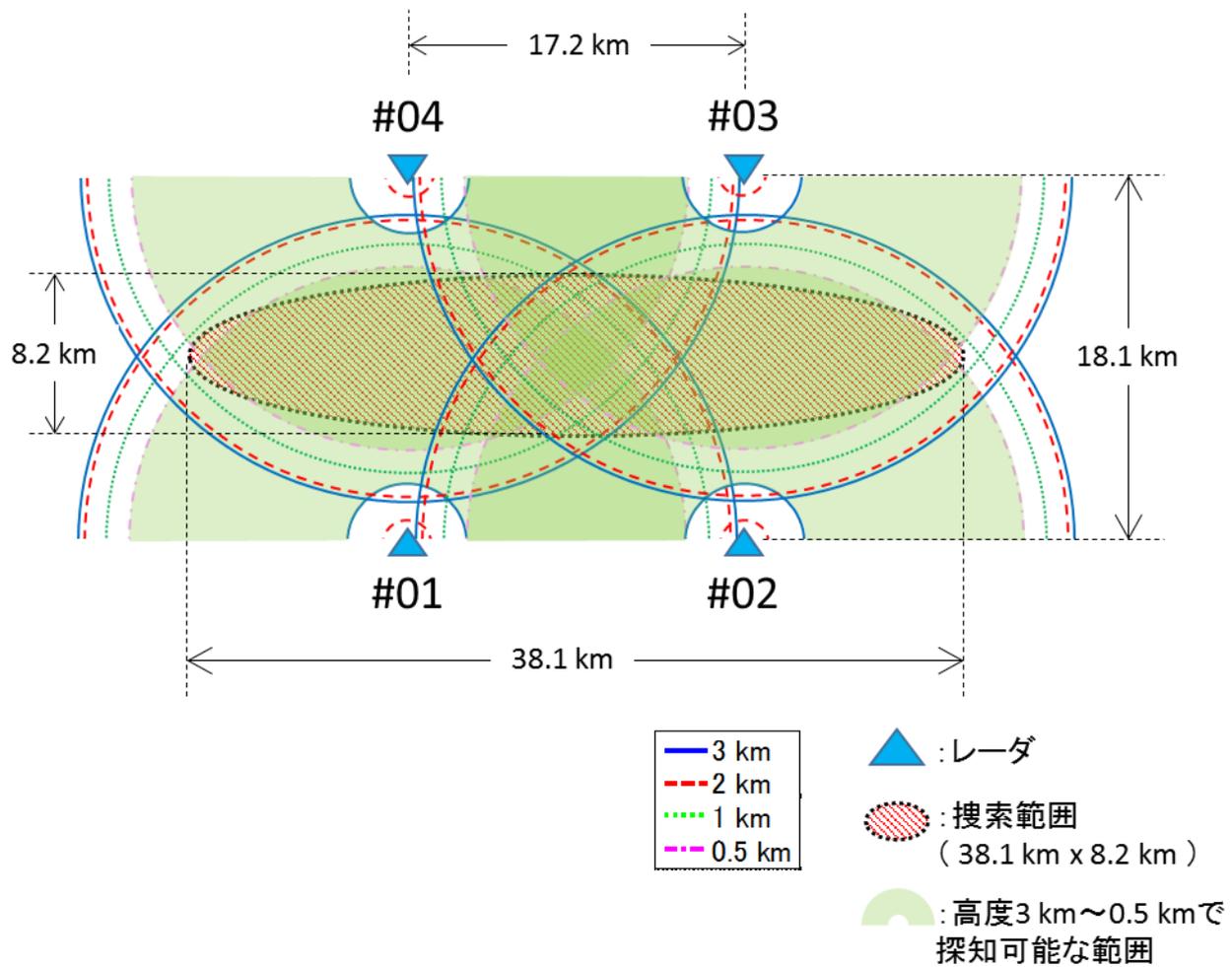


図 4-23 実測結果を基にした STARDUST 実績に対する搜索範囲性能
 $(\sigma = 0.2 \text{ m}^2, P_d = 0.9, P_f = 10^{-5}, E_l = 15 \text{ deg})$

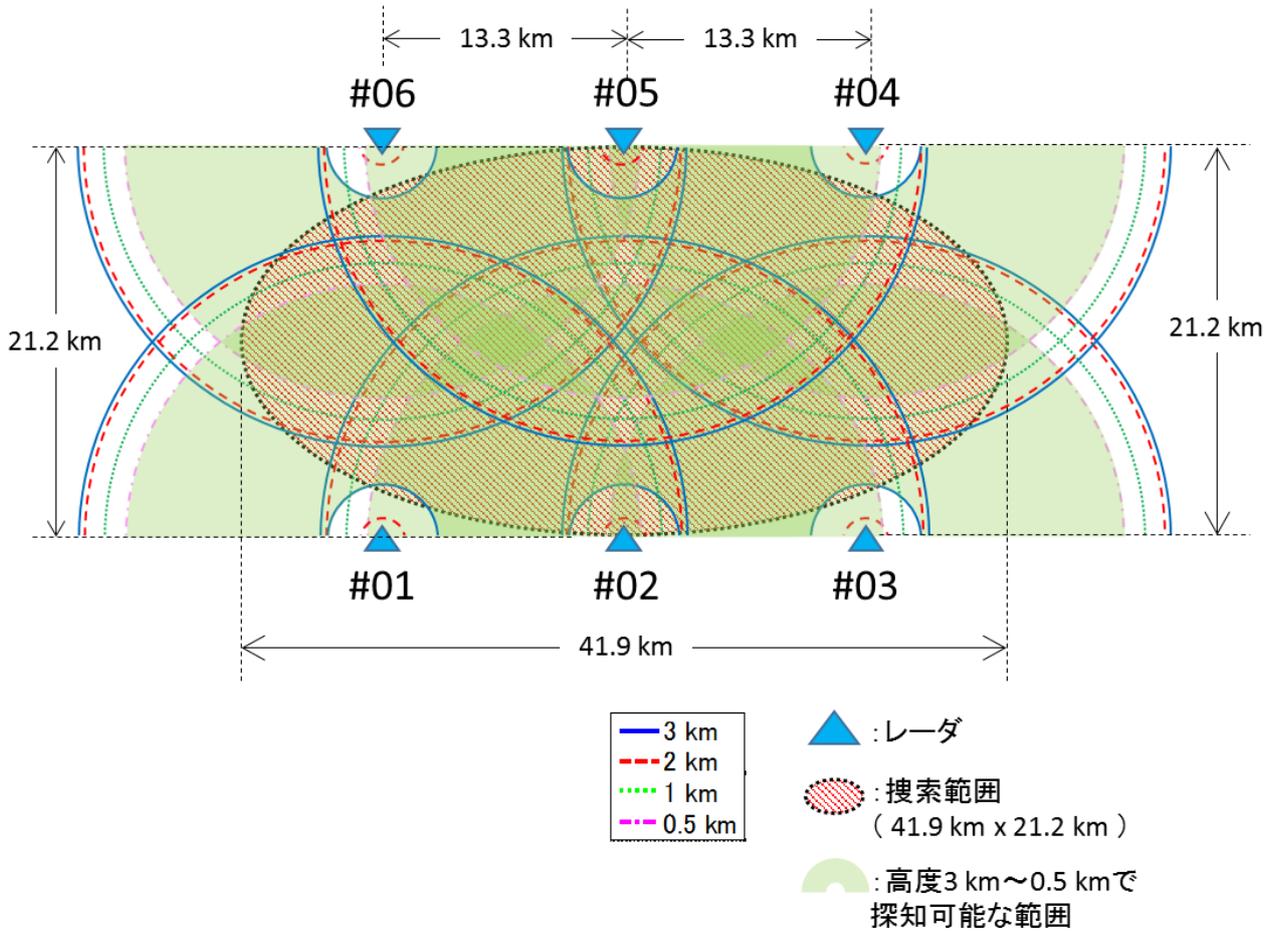


図 4-24 実測結果を基にした GENESIS 実績に対する搜索範囲性能
 $(\sigma = 0.2 \text{ m}^2, P_d = 0.9, P_f = 10^{-5}, E_l = 15 \text{ deg})$

4-2-4-2 検出回数

図 4-25 に垂直断面の探知距離性能に対し、式(2-6)を用いて算出した最小検出回数を示す。なおここではカプセルの降下速度を 6 m/s (表 2-1)、アンテナ回転速度を 6 rpm (表 2-6)、検出確率を 0.9 とした。表 4-4 よりいずれの探査ミッションでも高度 3 km から全搜索範囲での探知が可能であることから、全範囲で 37.5 回以上の探知が可能であり、表 2-6 で定義した 20 回以上の探知を果たすことができている。

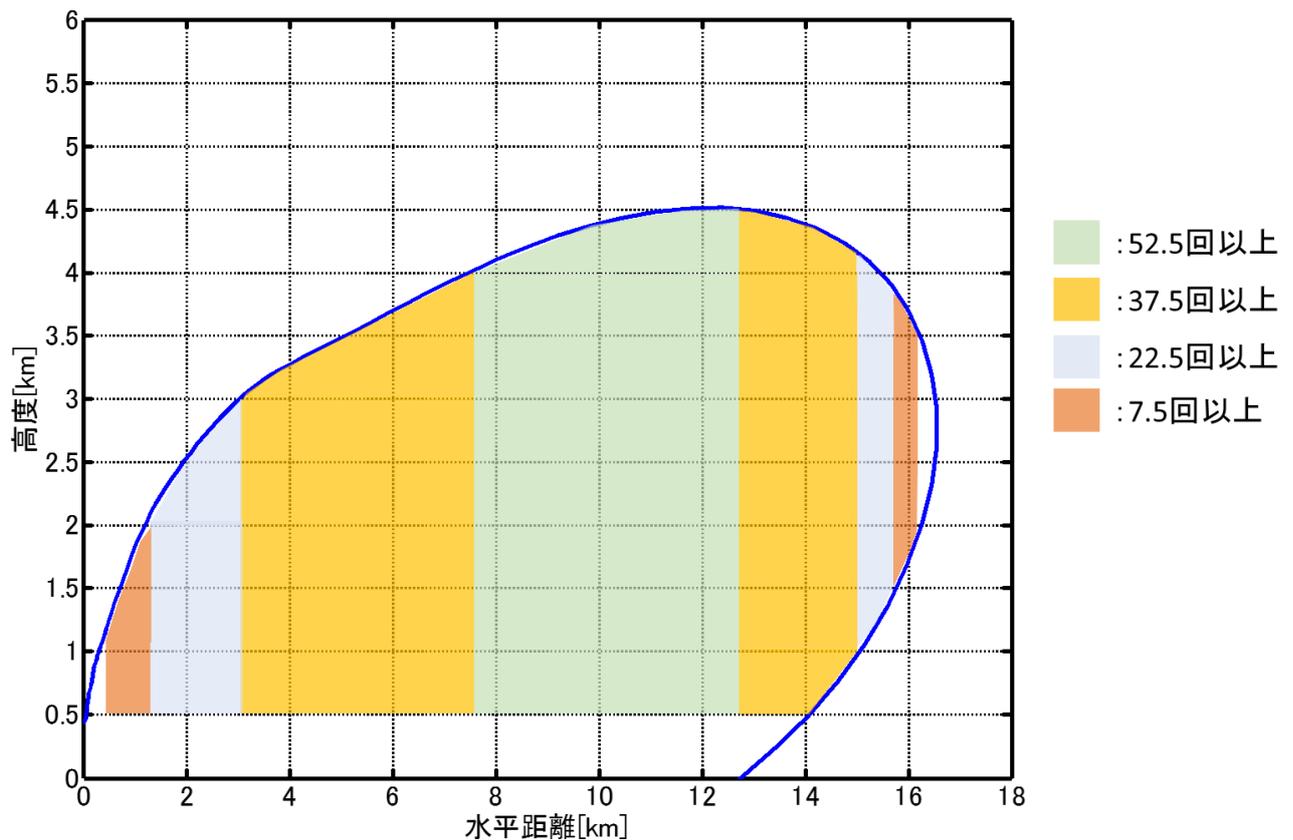


図 4-25 垂直断面の探知性能に対する検出回数
 $(\sigma = 0.2 \text{ m}^2, E_l = 15 \text{ deg}, P_d = 0.9, P_f = 10^{-5})$

4-2-4-3 検出距離分解能

提案システムにおける検出距離分解能は船舶用レーダの性質上、レーダに対する距離方向と方位方向の分解能に分かれ、距離方向に対しては P0N と Q0N の探知区間でその値が異なる。それぞれの探知区間における測定結果を図 4-26 および図 4-27 に示す。パルス幅の定義を 3 dB 低下点で定義したとき、この値はそれぞれ 150 m, 40 m であった。方位方向の距離分解能はアンテナの水平方向のビーム幅とレーダからカプセルまでの距離により決まり、距離が長くなるほどに分解能が低下する。提案システムにおいてこの距離が最も大きくなるのは、図 4-21 で検出確率を 0.9 とした場合、水平距離 16.55 km, 高度 2.92 km のときであり、このときの直線距離は 16.8 km である。遠距離探知試験における同程度の距離 (17 km) での測定結果を図 4-28 に示す。このとき方位方向の距離分解能は 230 m であった。以上より検出距離分解能は最大でも 230 m であり、初代はやぶさにおける電波方向探査局による降着地点推定が $\pm 1 \text{ km}$ 以内の精度であったことから考え、十分な値が得られているものと判断した。

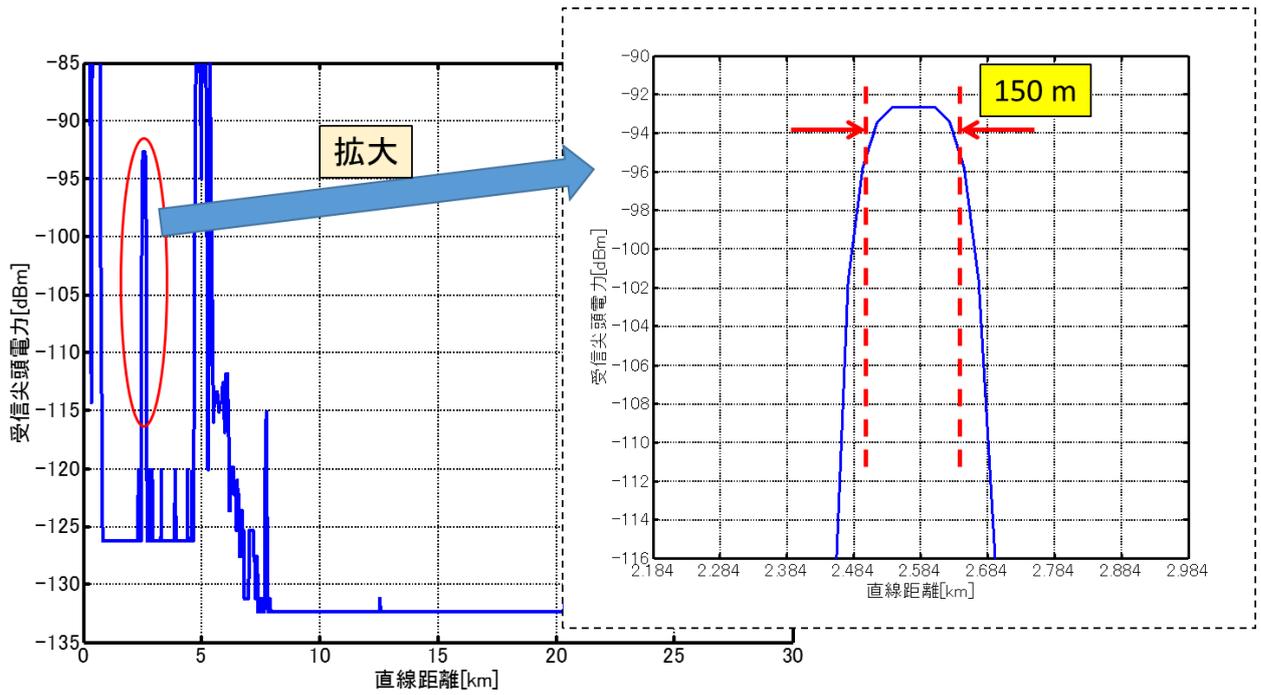


図 4-26 P0N の探知区間における距離方向距離分解能の実測結果

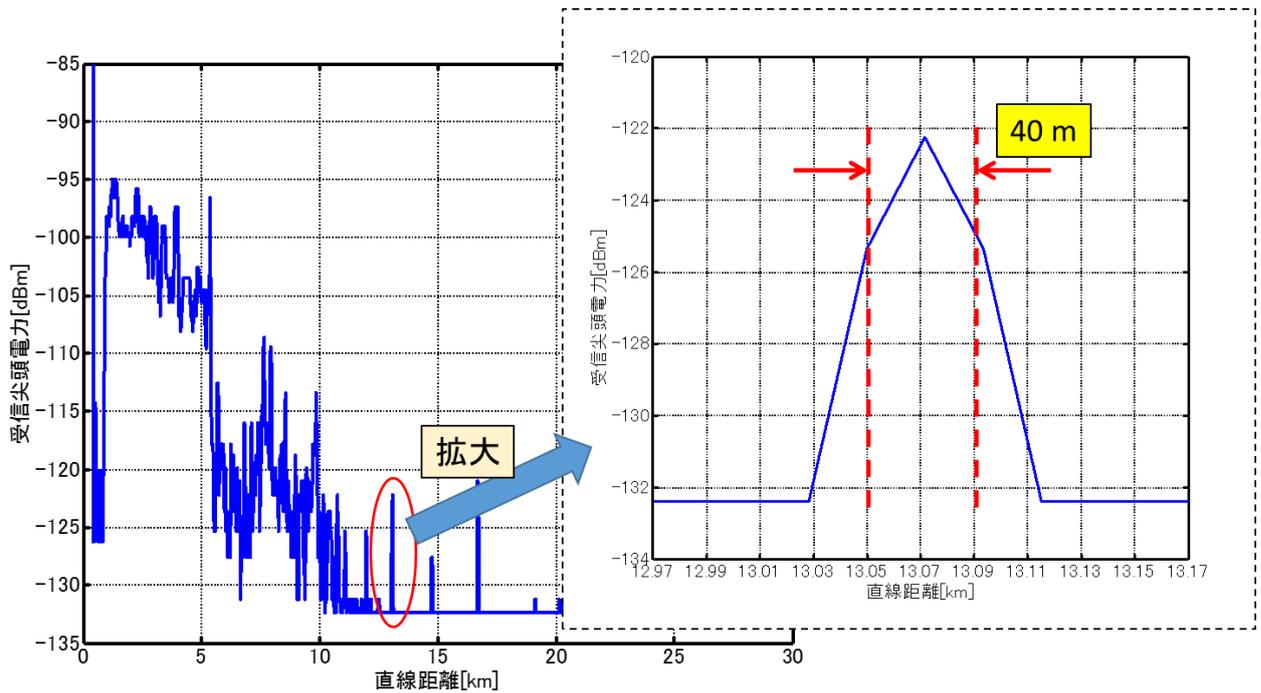


図 4-27 Q0N の探知区間における距離方向距離分解能の実測結果

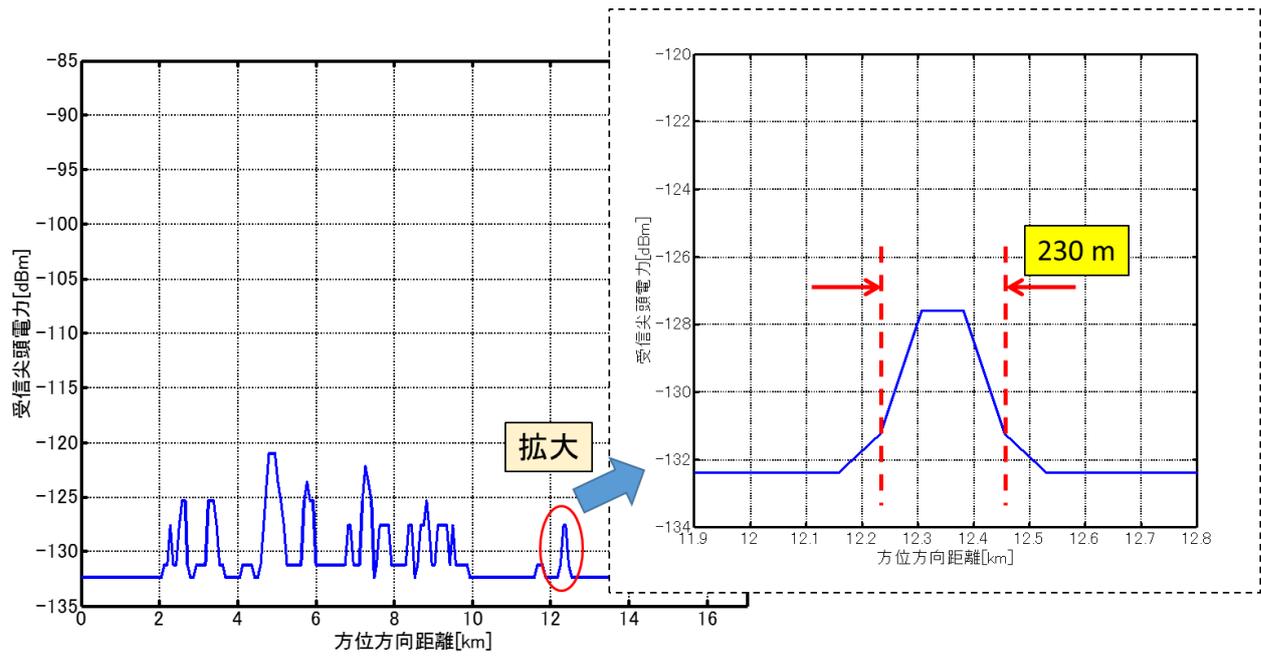


図 4-28 方位方向の距離分解能の実測結果

4-3 遠距離探知試験結果に基づいた実運用に向けた考察

4-3-1 環境雑音に関する検討

遠距離探知試験の結果には離散的かつ広範な環境雑音が含まれ、図 4-18 の領域①後半から領域②全般にわたって探知結果が得られなかった。これには USC 周辺海域からの海面反射が影響したものと考えられる。海面反射は近距離では距離の 3 乗、遠距離では 7 乗に反比例し、その分岐点 R_c は式(4-3)のようにアンテナの設置高 H_s と海面高 H_e により変わる^{[4-4], [4-5]}。試験用レーダは海拔 226 m に設置されており (図 4-15)、海面高を 0.5 m と仮定した場合でも $R_c = 42.5$ km となることから、観測範囲全域にわたり強い海面反射があったものと考えられる。

$$R_c = \frac{H_s H_e}{\lambda} \quad (4-3)$$

アンテナ設置高の影響を確認するため、千葉県南房総市にある和田浦海水浴場において環境雑音の測定を行った (図 4-29)。遠距離探知試験と測定場所は異なるが、同様に海を臨む環境であり、気候にも大きな差異はない (風速 2.0m/s, 1 時間当たりの日照時間 10 分)。前述と同様に海面高を 0.5 m と仮定した場合、アンテナ設置高は 4 m であったことからこのときの R_c は 0.8 km となる。



図 4-29 環境雑音の測定環境

測定結果例を図 4-30 に示すが、図 4-17 と比べ、離散的および広範な環境雑音とも明らかに少ないことがわかる。この測定は約 10 分間行ったが、図 4-17 のような環境雑音は常に観測されなかった。初代はやぶさに加え、STARDUST^[4-6]、GENESYS^[4-7]ともカプセルの回収予定地はいずれも広大な砂漠地

帯であったことから、実運用時のアンテナ設置高は低いことが予想され、また周辺に大きな障害物も少ないことが考えられる。このことから実運用時には環境雑音による影響は少ないことを想定するが、実際には回収予定地における事前調査は必須であると考える。

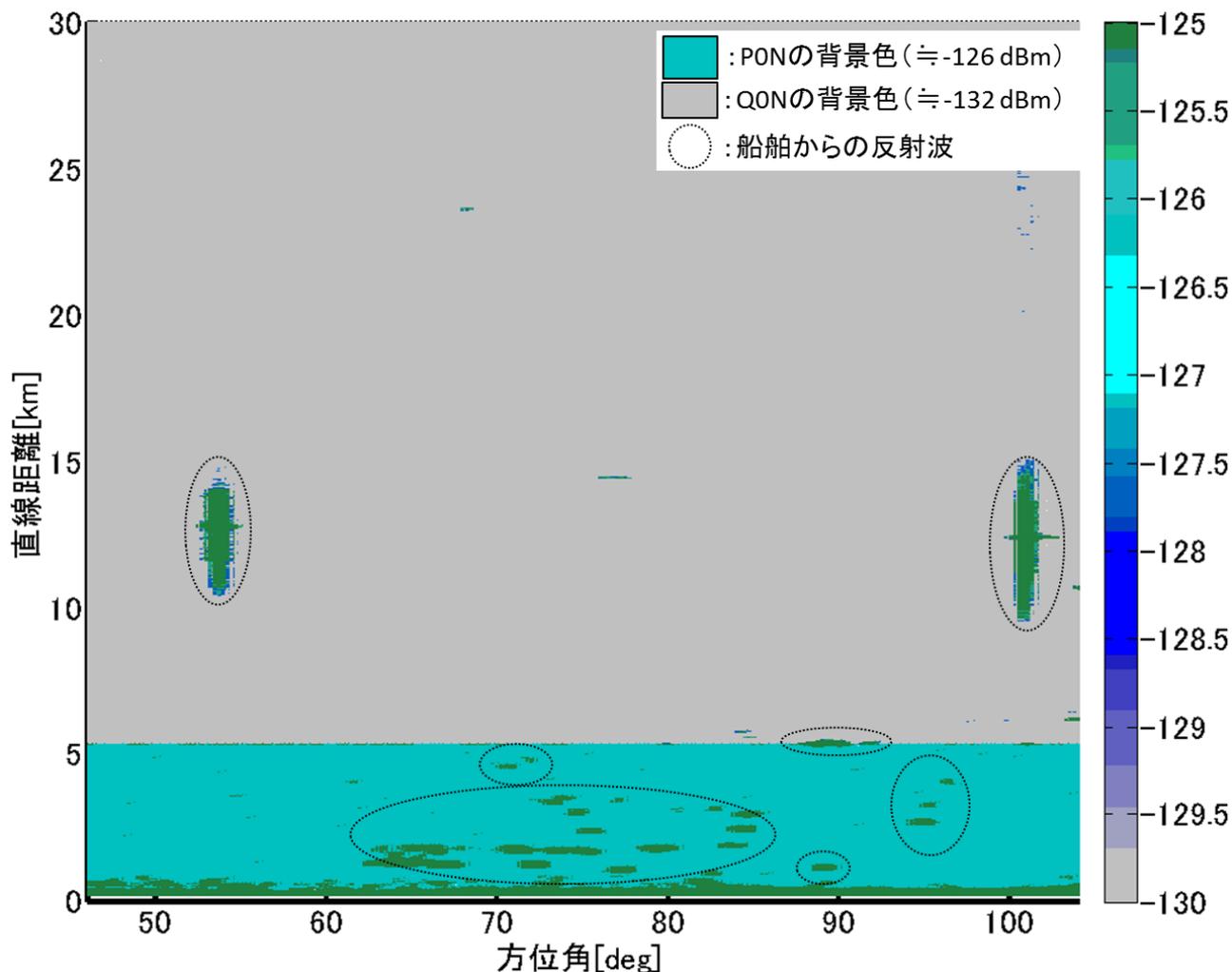


図 4-30 環境雑音に関する追加試験結果例

4-3-2 自律制御および追跡能力向上に向けた考察

これまでの試験では搜索範囲設定などのレーダの操作や探知結果の判定はすべて操作者（人）が行った。提案システムにおいてこれらの自律性を高めることはヒューマンエラー回避や運用コスト低減の観点で望ましい。また図 2-1 に示した複数のレーダ間で搜索内容や探知結果の共有を図れば、カプセルの移動に応じて複数局を連動させたより広範な追跡や、同一地点搜索による更なる精度向上なども期待できる。

システムの自律性および推定能力の向上にはカプセルの自動判定および追跡が基本となるため、この検討を行った。検討では実運用時の環境を模擬するために、まず前項の環境雑音の試験結果に、遠距離探知試験の気球周辺のデータを組み合わせた。このデータに対し、下記の手順で判定・追跡の自動化を試みた。

[自動判定] (図 4-31)

- ① しきい値を設定して 2 値化した画像を区画ごとにラベリング
- ② ラベリングされた区画に対し、面積判定を行って大き過ぎるものは気球ではないと判断して除去
- ③ 同一区画内で受信電力が最大の箇所を代表地点とし、丸印でマーキング
- ④ 判定対象範囲内の丸印のみを表示
(判定対象範囲：角度 65～93 deg, 距離 10～20 km)

[自動追跡] (図 4-32)

- ① 自動判定により得た位置情報に対し、移動速度を 30 m/s 以下と想定して最大移動範囲を設定
- ② 次の面において①の範囲内に存在する物標のみを残し、他を削除
- ③ 残った物標の位置情報を記録し、前回の位置との間を線で結ぶ

上記は非常に簡素な手法ではあるが、図 4-32 より気球の軌跡を比較的良好に追跡できていることがわかる。今回は検索範囲や判定対象範囲を固定した状態で検討を行ったが、実運用ではこれら範囲の変更を行いながらの追跡が想定されるため、今後はこの検討を進めて追跡機能の高度化を図りたい。

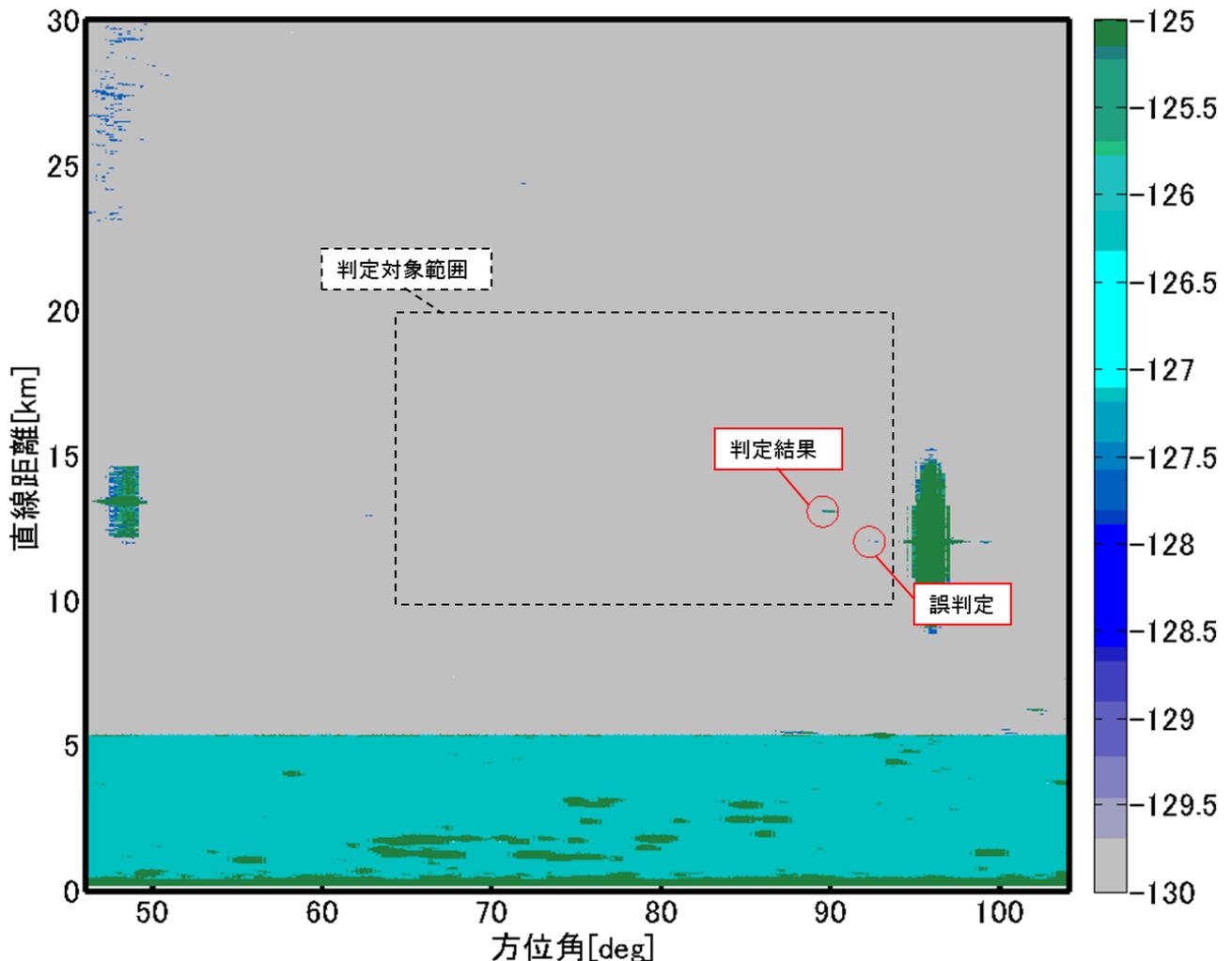


図 4-31 気球の自動判定例

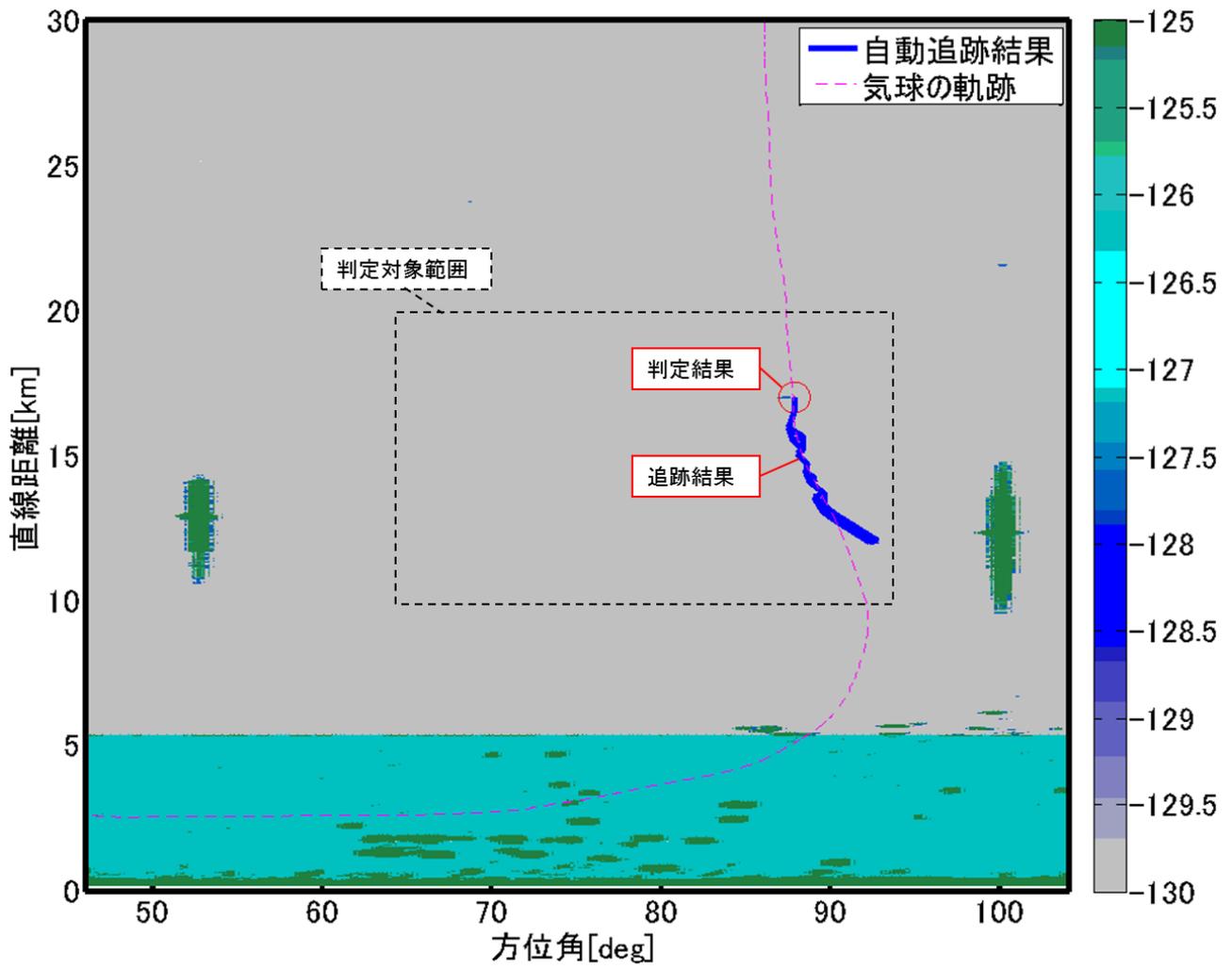


図 4-32 気球の自動追跡結果

4-4 文献

- [4-1] J. E. Cilliers, J. C. Smit: Pulse Compression Sidelobe Reduction by Minimization of Lp-Norms, IEEE Trans. AERO, Vol. 43, No. 3, pp. 1238-1247, July 2007.
- [4-2] 伊藤信一: レーダシステムの基礎理論, コロナ社, 2015.
- [4-3] 水野貴秀, 川原康介, 山田和彦: ビーコンを使った再突入カプセルの搜索システムとその運用, 日本航空宇宙学会誌 60 卷 7 号, pp. 250-256, 2012.
- [4-4] 楠順三, 庄司和民, 中西宏, 田口一夫: Radar の反射強度に関する実験について, 日本航海学会誌 20 卷, pp. 13-28, 1959.
- [4-5] H. Goldstein: Frequency dependence of the properties of sea echo, Phys. Rev, Vol. 70, pp. 938-946, Dec. 1946.
- [4-6] Prasun N. Desai and Garry D. Qualls: Stardust Entry Reconstruction, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, VOL. 47, NO. 5, pp. 736-741, Sept - Oct.2010.
- [4-7] Prasun N. Desai: Entry, Descent, and Landing Operations Analysis for the Genesis Entry Capsule, JOURNAL OF SPACECRAFT AND ROCKETS, VOL. 45, NO. 1, pp. 27-32, Jan - Feb.2008.

第5章 将来に向けた展望

5-1 より広範な搜索範囲への対応

前章まででは過去の探査ミッションの実績を対象とした搜索性能の検討を行ってきたが、カプセルの予測降着範囲は降着当日の天候などに左右されるため、より広範囲の搜索範囲が設定された場合の対応を検討しておくことは有益であると考える。そこで本節では現在運用中の OSIRIS-REx で想定している搜索範囲である 80 km×20 km の楕円^[5-1]を題材として、その場合の搜索性能を検討する。

OSIRIS-REx では 2-3 節のレーダ配置ルールに従った場合、短軸距離が 18.1 km を超えるので、配置ルール 3 に当たる。このときのレーダ配置を図 5-1 に、遠距離探知試験結果を基にした搜索範囲のカバー率を表 5-1 に示す。この搜索範囲に対しても、提案システムの配置ルールを適用すれば高度 3 km 以下で全搜索範囲の探知が可能であるが、レーダが 10 局必要となるため、ミッションの低コスト化の観点において何らかの方策を講じたい。

この方策として最も有効であるのは、搜索範囲内へのレーダの設置である。このときのレーダ配置と搜索範囲のカバー率をそれぞれ図 5-2、表 5-2 に示す。搜索範囲内へのレーダの設置を許容した場合には、当然のごとくレーダの局数は削減され、十分なカバー率も見込める。しかし推定搜索範囲内への人員の配置は困難であるため、この配置ルールを適用する場合には各レーダのデータを何らかの通信手段により収集する必要が生じる。船舶用レーダはイーサネットによる通信が可能であるため、通信手段が用意できればこれを解決できるが、回収予定地は人家のない広大な地域が選定されるため、公共の通信手段を期待することは難しい。一方、近年ではレーダに通信機能を付加する研究が行われており^{[5-2][5-3]}、提案システムにおいても同様の機能付加を果たせば、回収予定地の通信環境に依存しないシステム構築が可能になると考える。

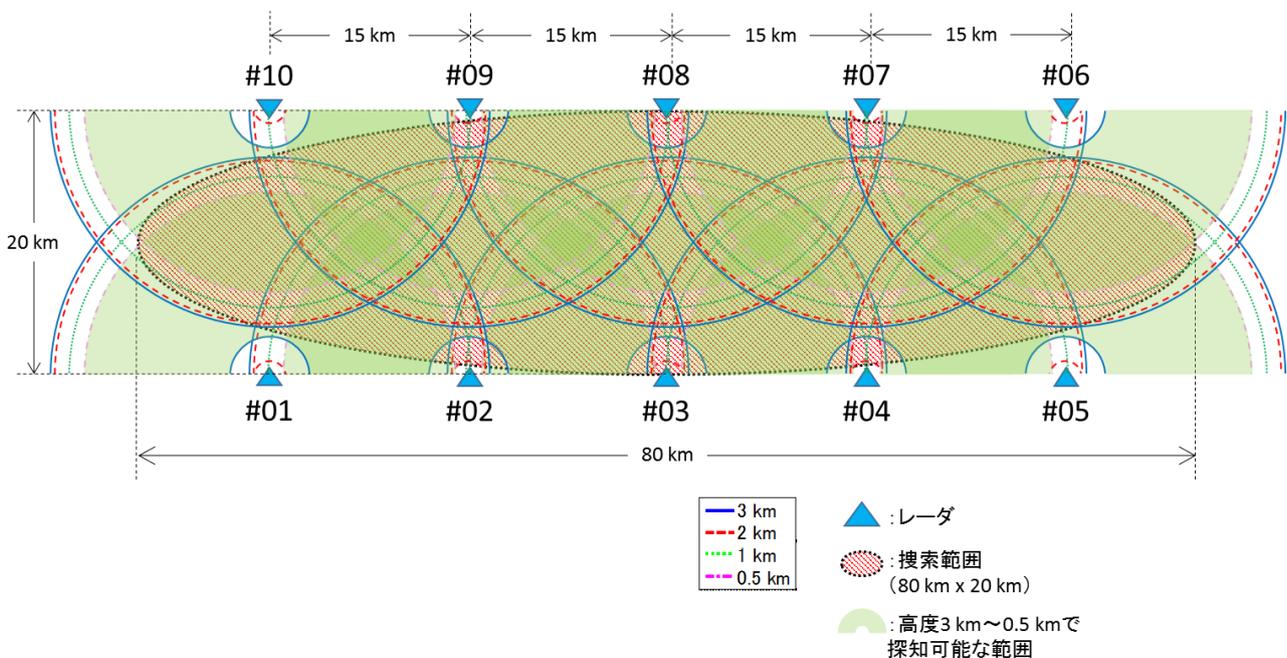


図 5-1 OSIRIS-REx の推定搜索範囲に対するレーダ配置

表 5-1 OSIRIS-REx の推定搜索範囲に対するカバー率

高度	OSIRIS-REx
3 km	100 %
2 km	100 %
1 km	100 %
0.5km	100 %

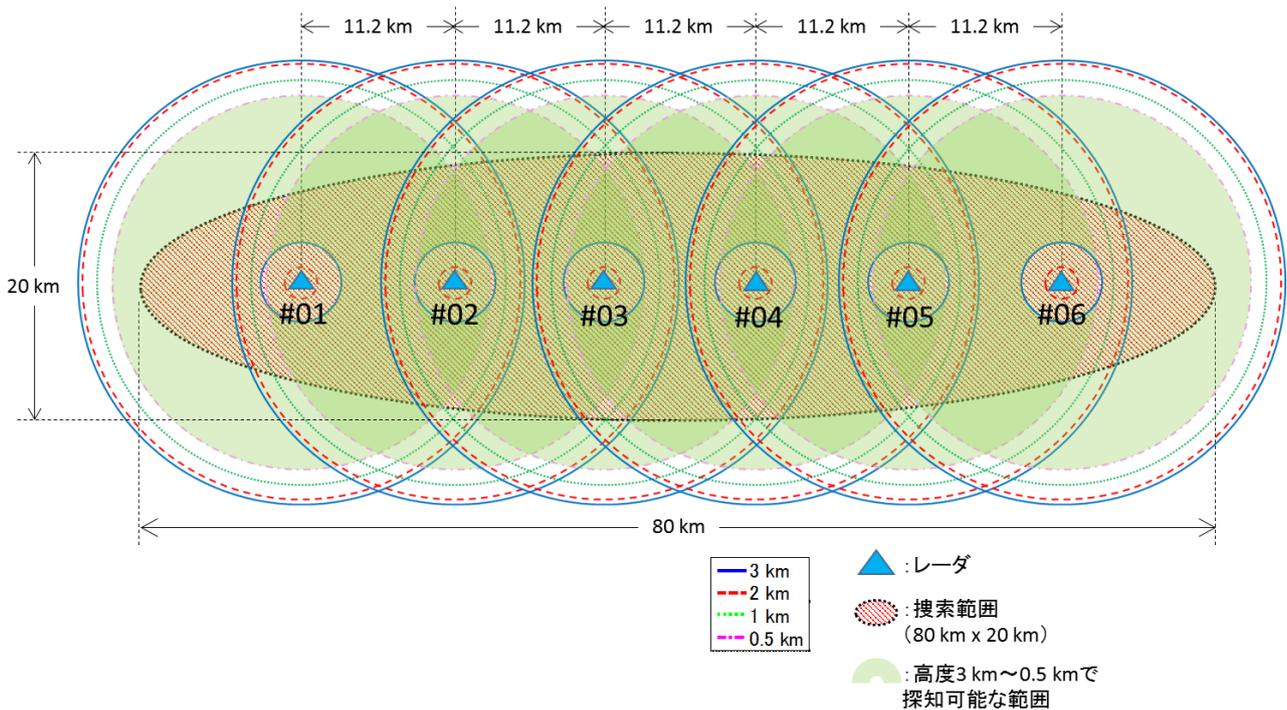


図 5-2 搜索範囲内への配置を許容した場合の OSIRIS-REx のレーダ配置

表 5-2 搜索範囲内へのレーダ配置を許容した場合の OSIRIS-REx のカバー率

高度	OSIRIS-REx
3 km	100 %
2 km	100 %
1 km	100 %
0.5km	100 %

5-2 フェーズドアレー技術の導入

提案システムでは船舶用レーダのアンテナとして一般的である、水平方向に狭く、垂直方向に比較的広い指向性ビームをもつアンテナを水平方向に機械的に回転させる搜索レーダを想定したが、ここにフェーズドアレー技術^[5-4]を導入した場合、以下の効果が期待できる。

- ① アンテナの指向角度を水平だけではなく、垂直方向にも制御することにより高度情報も取得可能

となる

- ② 垂直ビーム幅を小さくすることができるので環境雑音の影響が低減できる
- ③ 追尾機能により対象位置の集中的な探知が可能のため探知精度の向上が図れる

このアンテナとして図 5-3 のような基本ユニットを図 5-4 のように組み合わせる方式を想定すると、基本ユニットの組み合わせによりミッションごとの搜索範囲条件に応じたアンテナ性能の選択自由度も獲得できると考える。

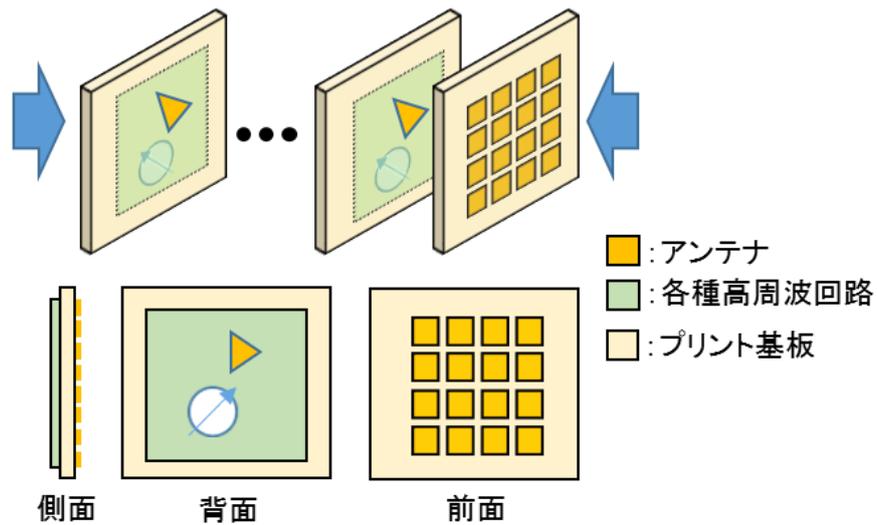


図 5-3 基本ユニットの構築構想

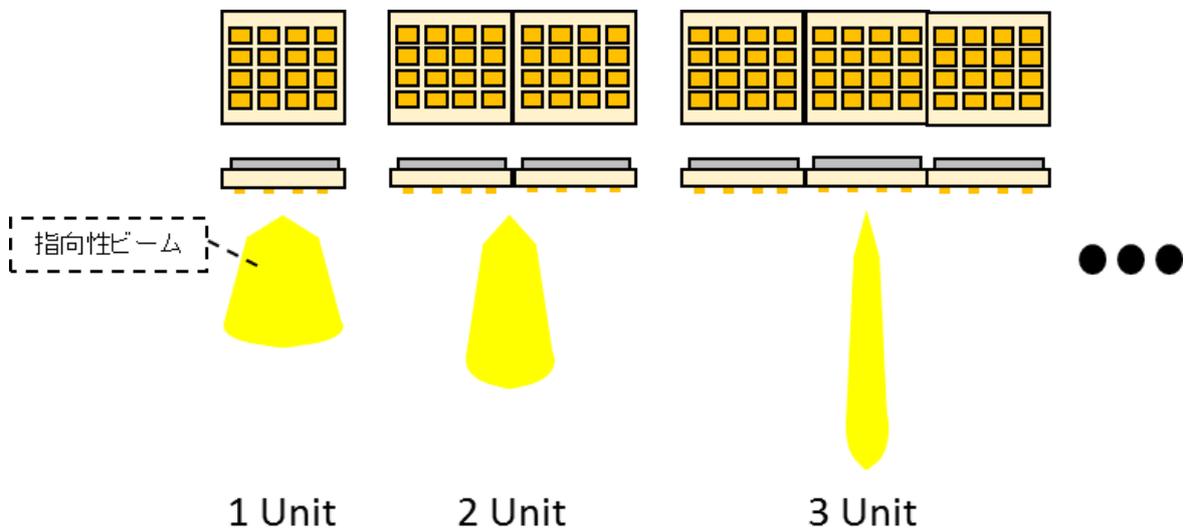


図 5-4 基本ユニットの組み合わせによるアンテナ性能イメージ

5-3 文献

- [5-1] Thomas Ajluni, Timothy Linn, William Willcockson, David Everett, Ronald Mink, and Joshua Wood: OSIRIS-REx. Returning the Asteroid Sample, IEEE Aerospace Conference, MT, Jun.2015.
- [5-2] 高橋徹, 加藤泰典, 磯田健太郎, 橘川雄亮, 三本雅: レーダ／通信共用のための送信波形の一検討, 信学技報, pp. 31-36, July.2018.
- [5-3] 宮澤義幸, 川原昌利, 阿部武司, 北沢弘則: レーダ通信システムの実証実験結果, 信学総大, B-2-60, Mar.2012.
- [5-4] 伊藤信一: レーダシステムの基礎理論, コロナ社, 2015.

第6章 結論

本研究では惑星探査ミッションにおける再突入カプセルの捕捉に対し、カプセル搭載機器に頼らず、可搬性を有する船舶用レーダを用いたデュアルユースシステムを提案し、宇宙・民生共通の課題である可搬型レーダの高出力化やパルス波形歪の低減を図ってシステムを構築、その実測結果を基に提案システムの実現性を実証した。

はじめに提案システムにおいて最も重要となる探知距離性能に着目をし、各レーダの要件や複数レーダの配置方法をルール化して、搜索範囲性能に関するフィージビリティスタディを行った。各レーダの要件としては装置の他国への持ち込みを考慮して輸出が容易な船舶用レーダの技術的条件を逸脱しない範囲で探知距離が確保できるように仕様を定義し、加えて大地反射波の低減、より高高度からの探知といった観点からアンテナの設置仰角を決定した。複数レーダの配置ルールについては、ミッションにより必要とされる搜索範囲が異なることを考慮し、一意にレーダ配置が決定できるよう搜索範囲の楕円短軸を選択基準として3種のルールを定義した。搜索範囲性能のフィージビリティスタディは、サンプルリターンミッションとして実績のあるはやぶさや STARDUST, GENESIS の搜索範囲を対象として、探知可能な面積と搜索範囲の面積の割合を計算することにより行った。その結果、はやぶさ実績に対してはカプセル高度 3 km から 0.5 km において 100 % の範囲で搜索が可能であり、STARDUST では 98.1 % 以上、GENESIS に対しては 96.8 % 以上といった結果になった。いずれも 9 割以上の搜索範囲をカバーできていることから、提案システムは再突入カプセル捕捉に対して有用であると考えた。

次に可搬型レーダの高出力化のため高出力 GaN 増幅器の試作を行い、提案システムで必要とする 400 W の出力を得るための要素技術構築を行った。ここでは増幅器自体をコンパクトに実現することに加え、複数台の合成により所望の出力を得る必要があることから、複数製作時の性能再現性も重要となる。増幅器には小型化のため、熱伝導率、耐圧等に優れ、GaAs と同等のサイズでも大きな電力を扱える GaN のベアチップを用い、1つのベアチップで 50 W 以上の出力を得ることを目標とした。この増幅器は船舶用レーダ専用として狭周波数帯域での設計が適用できるため、整合は入出力各1つのインピーダンス変成回路のみで行って小型化を図った。製造にはベアチップを実装する金属プレートや溶剤ペーストに関して、それぞれ熱伝導率の優れた銅と Sn-3.0/Ag-0.5/Cu を用いることで排熱の効率化も図った。この結果 9 mm×5 mm で整合回路を実現し、周波数 9.4 GHz およびパルス幅 10 μ s、デューティ比 10 % において、最大出力 69.2 W で利得 8.2 dB、効率 39.3% を得ることができた。加えて合成の際に重要となる性能再現性については、同じ増幅器を 5 台製作し、それらの特性差が最大出力で ± 3.75 W、利得で ± 0.65 dB、ドレイン効率で ± 1.45 %、電力付加効率で ± 1.7 % といった結果を得て、良好な再現性が得られることを確認した。またこの増幅器を 2 つ合成することによって想定どおりに 100 W を超える出力が得られることも確認できたことから、さらなる高出力化に向けためどが得られたと考える。

一方固体パルスレーダにおいては、より高精度な探知のためにパルス信号の時間波形が重要となることから、試作した高出力 GaN 増幅器に対し、使用条件の差異や増幅器入出力間の波形差異に着目をした評価を行った。結果として使用条件の差異に対する影響は比較的軽微であることがわかったが、入出力間の波形差異に着目をした評価では、高出力 GaN 増幅器の非線形動作および過渡応答の影響により、出力波形が入力波形に対し、振幅の時間傾斜で最大 79.6 %、パルス幅で最大 1.5 % 増加して、パルス圧縮結果に SNR の劣化として現れることがわかった。こうした波形歪に対して使用条件による特性変化を想定した場合、一般的には信号出力部にフィードバック回路を用いた補償が行われるが、この種の回路の追加は小型化の観点では望ましくない。そこで本研究では所望信号の前後に、後の信号処理で分離が可能なダミー信号を付加することでこの影響を低減する手法を提案した。ダミー信号として所望信号と

中心周波数が異なる無変調パルス信号を用い、受信側において帯域フィルタによりダミー信号を取り除く手法によって増幅器入出力間におけるパルス波形の形状差異が軽減され、パルス圧縮後の SNR が 5 dB 程度改善することを実測により確認した。この手法はパルス幅の増大を伴うが、フィードバック回路を使用せずに電氣的、熱的に安定した領域での動作が確保できるため、小型かつ安価にレーダを構築したい場合には有効であると考えられる。

最後に試作した 50 W および 100 W 出力級の高出力 GaN 増幅器を用いて試作レーダを構築し、その実測結果を基に提案システムの搜索性能を実証した。試作レーダの構築では本研究で開発した高出力 GaN 増幅器に加えてプリアンプやバイアス制御回路を追加してモジュール化を果たし、新たに送受信機の開発も行ってシステム雑音を抑えた上でのシステム構築に成功した。実測では提案システムで想定する距離・高度における小型飛行体の探知試験を行った。この試験では $\sigma=0.159\text{ m}^2$ の物標に対して水平距離 10 km 以上、高度 2 km 以上の探知を行い、最大では水平距離で 17.2 km、高度 3.3 km、直線距離で 17.5 km もの遠距離での探知に成功した。この試験結果を基にした提案システムの搜索性能実証では、はやぶさ、STARDUST、GENESIS の搜索範囲に対して高度 3 km から 0.5 km で 100 % のカバー率で探知可能であることを示した。またそのときの検出回数は 37.5 回以上であり、検出距離分解能は、レーダに対する距離方向で近距離 (5.4 km 未満) では 150 m、遠距離 (5.4 km 以遠) では 40 m であることを示し、方位角方向に対しては距離に応じて変化するが最大でも 230 m 以下であることを示した。船舶用レーダの検出回数規定である 20 回以上の検出回数を果たしたこと、およびはやぶさ実績における位置推定の結果が $\pm 1\text{ km}$ であったことなどから、これらの値はカプセル回収ミッションに十分に耐え得るものと考えられる。また試験において課題となった環境雑音に対しては、遠距離探知試験時のアンテナ設置高が影響したと考え、追加試験によって得られた結果からこれを示し、実際のミッションにおいて問題となる可能性は低いことを述べた。加えて提案システムの自律性向上を目的として試験結果を用いたカプセルの自動判定・追跡の考察を行い、気球の軌跡を良好に追跡できることを示した。

本研究では宇宙用と民生用とのデュアルユースといった新しい観点を導入し、それらの共通課題の解決を図って提案システムの実現性を実証した。すべての結果は実測値を基にしていることから、近い将来のミッションに実用レベルで貢献できるものと考えられる。加えて第 5 章に示した通信機能付加やフェーズドアレイ技術の導入を果たせば、提案システムのさらなる高度化も期待できる。

謝辞

総合研究大学院大学物理科学研究科宇宙科学専攻 川崎繁男教授には、著者の指導教員として、多くのご指導・ご助言を賜りました。特にメーカの開発者としてキャリアを積んできた著者に対し、研究者としての着眼点や心構えについて賜りましたご助言は大変貴重であり、今後の技術者としての発展にも有益なものであると考えます。心より御礼申し上げます。

東北大学 末松憲治教授，九州大学 Pokharel Ramesh Kumar 教授，総合研究大学院大学 山本善一教授，津田雄一准教授におかれましては、お忙しい中、学位審査において大変貴重かつ有意義なご意見、ご助言を賜りました。皆様から頂いた工学・宇宙応用の観点からの様々なご助言により本研究をまとめることができました。謹んで御礼申し上げます。

宇宙航空研究開発機構 國中均理事には、著者が宇宙科学に接するきっかけと本研究の根幹を成す視点を与えて頂きました。頂いた視点がなければ本研究は成立していなかったと思います。厚く御礼申し上げます。

宇宙航空研究開発機構 中澤暁氏，山田哲哉准教授，川原康介氏，伊藤大智氏にはカプセル回収に関する大変貴重なご助言を賜り，また USC における遠距離探知試験でもご協力を頂きました。この試験では，宇宙航空研究開発機構 山田辰二氏，小濱悟氏，感應寺治城氏，佐藤峻介氏，宇宙技術開発株式会社 木下忍氏，長浜宗治氏にも多大なるご協力を頂きました。皆様にご協力を頂いたことにより，本研究の最も重要な成果を得ることができたと考えております。謹んで御礼申し上げます。

株式会社東洋技術工業 森口幸男氏，株式会社ダイレクト・アール・エフ 戸谷一幸氏には高出力増幅器の設計手法について貴重なご助言を賜りました。高出力増幅器についてまったく知識がなかった著者が本研究を遂行することできたのは頂いたご助言によるところが多分にあったと感じています。深く感謝致します。

電気通信大学 山尾泰教授，木村敦氏には MMF の信号処理において多大なご協力およびご助言を頂きました。東京航空計器株式会社 村田和雄氏には再現性の高い GaN 増幅器の製作技術を確立するために大変なご尽力を頂きました。皆様方のご協力のおかげで本研究を遂行することができました。厚く御礼申し上げます。

株式会社光電製作所 荒田慎太郎代表取締役社長には、メーカのいち開発者に過ぎなかった著者が学位取得に取り組むために多大なるご支援を頂き、また日々の業務・研究に対する激励を頂きました。海賀和彦開発グループ執行役員には、就学前後問わず常に技術的なご指導・ご助言を賜っています。満井勉開発課課長には同じ社会人博士を取得した観点から、大変有意義なご助言・ご支援を頂きました。ここに記載しきれない開発部員の方々にも、研究を優先させなければならない場面が多々あったことから、日ごろの業務において多大なるご迷惑をおかけしてしまったとともに、たくさんのご支援を頂きました。皆様に支えて頂きましたおかげで、本研究を進めることができました。深く御礼申し上げます。

最後に、研究・仕事に没頭できる環境を支援してくれた妻ゆかりと、日ごろから元気を与えてくれる長男悠月，長女果歩，またどれだけ夜遅くまで研究しても壊れない丈夫な体を授けてくれた両親に感謝して、本学位論文の謝辞と致します。

論文リスト

【論文，筆頭】

林大介，川崎繁男，“船舶用レーダを用いた帰還カプセル追跡システムの探知性能に関する検証”，日本航空宇宙学会論文集，Vol. 67，No. 1，pp. 9-15，2019年02月。

林大介，川崎繁男，川原康介，伊藤大智，山田哲哉，中澤暁，“小型飛翔体の遠距離探知試験に基づいた帰還カプセル追跡レーダの考察”，日本航空宇宙学会論文集，Vol. 67，No. 6，2019年12月（掲載予定）。

【レター，筆頭】

Daisuke Hayashi，Norihito Hamada，and Shigeo Kawasaki，“Time-domain distortion of a pulse-operated high-power GaN amplifier and a reduction method”，IEICE Communications Express (ComEX)，Vol.8，No.4，pp. 87–92，Jan. 2019.

【国際学会発表，筆頭】

Daisuke Hayashi，Shintaro Arata，and Shigeo Kawasaki，“The Solid State Marine Radar system developed by JAXA”，ISTS，ISSFD & NSAT 2017，Ehime，June.2017. (Invited)

Daisuke Hayashi，Ryoko Kishikawa，and Shigeo Kawasaki，“High power high efficient compact GaN amplifier for the solid-state radar”，ISTS，ISSFD & NSAT 2017，Ehime，2017-j-06，June.2017.

Daisuke Hayashi，Yuichi Tsuda，and Shigeo Kawasaki，“Pulse Operation Characteristics of X-band High Power GaN Amplifiers for the Hayabusa2 Re-entry Capsule Tracking Radar”，APMC2018，Kyoto，WE1-K01，Nov. 2018.

【国内学会発表，筆頭】

林大介，岸川諒子，田住朝哉，中岡俊裕，川崎繁男，“固体化レーダー用高出力小型 GaN 増幅器の開発”，宇宙科学シンポジウム 2016，神奈川，P-183，2017年01月。

林大介，岸川諒子，古瀬結貴，中岡俊裕，川崎繁男，“X 帯固体化レーダー用高出力小型 GaN 増幅器の試作”，2017 電子情報通信学会総合大会，名古屋，C-2-12，2017年03月。

林大介，中野裕貴，川崎繁男，“固体化レーダー用高出力 GaN 増幅器のパルス動作特性”，第 61 回宇宙科学技術連合講演会，1K17，新潟，2017年10月。

林大介，荒田慎太郎，森口幸男，遠藤順人，吉田賢史，西川健二郎，川崎繁男，“X バンド通信レーダ用低コストコンパクト高効率 GaN アンプの開発”，宇宙科学シンポジウム 2018，神奈川，P-178，2018

年 01 月.

林大介, 中野裕貴, 川崎繁男, “アンテナ一体型 X 帯通信レーダ用高出力 GaN 増幅器の試作”, 2018 電子情報通信学会総合大会, C-2-16, 東京, 2018 年 03 月.

林大介, “固体化マリンレーダーの開発”, TANSAX コミュニティセミナー, 神奈川, 2018 年 05 月.

林大介, 荒田慎太郎, 川崎繁男, “固体化マリンレーダーの開発成果紹介”, 第 62 回宇宙科学技術連合講演会, 1B16, 久留米, 2018 年 10 月.

【論文, 非筆頭】

Azril Haniz, Gia Khanh Tran, Kentaro Saito, Kei Sakaguchi, Jun-ichi Takada, Daisuke Hayashi, Toshihiro Yamaguchi and Shintaro Arata, “A Novel Phase-Difference Fingerprinting Technique for Localization of Unknown Emitters”, IEEE Trans, Vol. 66, NO. 9, pp. 8445-8457, Sept.2017.

A.Torisaka, D.Hayashi, S.Kawasaki, N.Nishii, Y.Terada, S.Yokoyama, H.Sakamoto, “Development of shape monitoring system using SMA dipole antenna on a deployable membrane structure”, Acta Astronautica, Vol. 160, pp. 147-154, Apr.2019.

【国際学会発表, 非筆頭】

Azril Haniz, Gia Khanh Tran, Kei Sakaguchi, Jun-ichi Takada, Daisuke Hayashi, Toshihiro Yamaguchi and Shintaro Arata, “Hybrid fingerprint-based localization of unknown radios: Measurements in an open field”, APMC2017, Kuala Lumpur, TH 1-A, Nov.2017.

A. Torisaka, D. Hayashi, S. Kawasaki, N. Nishii, Y. Terada, S. Yokoyama, H. Sakamoto, “Development of shape monitoring system using SMA dipole antenna on a deployable membrane structure”, IAC2018, Bremen, IAC-18-C2.5.2, Oct.2018.

【国内学会発表, 非筆頭】

古瀬結貴, 清田春信, 宮地晃平, 中岡俊裕, 岸川諒子, 林大介, 川崎繁男, “ナノエレクトロニクスを用いた混成半導体集積回路 HySIC の接合技術”, 宇宙ナノエレクトロニクスワークショップ, 2016 年 12 月.

岸川諒子, 清田春信, 林大介, 吉田賢史, 西川健二郎, 古瀬結貴, 中岡俊裕, “宇宙機内ワイアレスセンサ用 HySIC 整流器の実現に向けた高周波非線形計測と回路設計”, 宇宙科学シンポジウム 2016, 2017 年 01 月.

岸川諒子, 林大介, 川崎繁男, “宇宙情報通信エネルギー技術による高性能半導体集積回路モジュールラインアップ”, 宇宙科学シンポジウム 2017, 2018 年 01 月.

鳥阪綾子，西井直輝，中野祐貴，藤森和博，岸川諒子，林大介，須田保，加藤礼，川崎繁男，“宇宙機搭載用小型薄型アクティブ集積アンテナの研究”，宇宙科学シンポジウム 2017，2018 年 01 月．

鳥阪綾子，西井直輝，林大介，川崎繁男，“SMA 材を用いた膜上構造物の形状センシング”，第 60 回構造強度に関する講演会，3B14，2018 年 08 月．