

多周波 CW 方式を用いた近距離着陸レーダのフェージビリティ検討

中島大輔[†], 稲葉敬之[†], 水野貴秀[‡], 福田盛介[‡]

[†] 電気通信大学大学院情報理工学研究所 〒182-8585 東京都調布市調布ヶ丘 1-5-1

[‡] 宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所 〒229-8510 神奈川県相模原市中央区由野台 3-1-1

E-mail: [†] nakashima.daisuke@inabalab.ee.uec.ac.jp

あらまし 月惑星探査機の着陸誘導に用いるセンサとしてマイクロ波を用いた着陸レーダの開発を進めている。本稿では、最終着陸フェーズ時の様な近距離（高度 10m 程度）での高度計測方式として位相情報に基づく多周波 CW 方式のフェージビリティ検討を行う。当方式では、狭帯域かつ少ない演算負荷にて高精度が期待される。しかしこれまで、地面という面状反射物に対する同方式の誤差解析研究は行われていなかった。本稿では地面反射を模擬した計算機シミュレーション、および同方式の小型レーダをクレーンかご台に取り付け、地面に対し降下させた状況での実験結果について報告する。

キーワード 着陸レーダ, 電波高度計, 多周波 CW 方式

Study on Multiple Frequency CW Radar for Landing Radar in Short Distance

Daisuke Nakashima[†] Takayuki Inaba[†] Takahide Mizuno[‡] and Seisuke Fukuda[‡]

[†] Graduate school of Informatics and Engineering, The University of Electro-Communications
1-5-1 Chofugaoka, Chofu, Tokyo, 182-8585 Japan

[‡] Japan Aerospace Exploration Agency(JAXA), Institute of Space and Astronautical Science(ISAS)

3-1-1Yoshinodai,Chuo, Sagamihara, Kanagawa,229-8510 Japan

E-mail: [†] nakashima.daisuke@inabalab.ee.uec.ac.jp

Abstract Landing radar for navigation lunar/ planetary has been developed in the JAXA/ISAS. In this paper, we propose Multiple Frequency CW radar for altitude estimation based on phase difference of each frequency in final landing approach about 10m altitude. In the proposed method, high ranging precision against a point reflector is expected even with narrow band and low computational load. However, error analysis study of range estimation in actual ground situation has not been done. This report describes that the statistical result by simulation study and field experiment result using a 24GHz radar .

Keyword Landing Radar, Radio Altimeter, Multiple Frequency CW radar

1. まえがき

宇宙航空研究開発機構宇宙科学研究所(JAXA/ISAS)では、月および惑星への着陸誘導に用いるセンサとして距離測定と速度測定を行う着陸レーダの開発を行っている。電波を用いた着陸レーダの利点はレーザ等他センサに比べ、着陸時の粉塵に強いこと、ビーム幅が広いので姿勢変化時にも高度計測が可能であることなどが挙げられる。着陸レーダに求められる計測高度域は、数千 m~数 m の範囲である。現在開発が進められている着陸レーダでは、高高度から低高度に降下するに従い、パルス圧縮方式から短パルス方式へと送信波

形を変更するパルスドップラ方式が採用されている[1][2]。しかし、着陸の最終フェーズ（高度 10m 程度で、着陸船を自由落下へと移行する時）の最低高度域では送信パルスとのアイソレーション問題で距離計測が難しくなるという課題がある[1][3][4]。

そこで筆者らは最終フェーズでのレーダ方式として、送信パルス立下りアイソレーション問題を回避可能なレーダ測距方式として位相情報を用いる測距方式（多周波ステップ ICW 方式）の計算機シミュレーションによるフェージビリティスタディを実施してきた[5]。今回本稿では、送信ピーク電力を抑えかつ更なる

狭帯域化（すなわち低消費電力）を図るために多周波ステップ ICW 方式に対しパルス化を省略（すなわち CW 化）した「多周波 CW 方式」へと変調方式を簡素化し、地面反射を模擬した計算機シミュレーションおよび同方式小型レーダをクレーンかご台に取りつけた状態での実験的評価を行ったので、その結果について報告する。

2. 多周波 CW 方式

多周波 CW 方式は、多周波ステップ ICW 方式[6]を CW 化しより狭帯域で近距離計測を可能とした方式である。多周波 CW 方式は、各周波数での送信波に対する検知ドップラ周波数スペクトルの位相差による測距原理に基づいているため、速度視野は狭いものの数十 kHz という低速の A/D 変換機および信号処理にて高い距離精度が得られることを特徴としている。また、2 周波でなく多周波とすることで等相対速度の距離分離性能が向上する利点を有しており、着陸レーダのように計測対象が多数の反射点で構成された地面等にたいし直下反射信号の抽出に有利であると考えられる。

以下、多周波 CW 方式による目標相対速度及び直下高度検出処理について説明する。

2.1 多周波 CW 方式における目標相対速度・直下高度検出処理

図 2.1 に多周波 CW 方式の送信周波数シーケンスを示す。本方式は、周波数 $f_n (n=0,1,\dots,N-1)$ の CW 波を図 2.1 に示すタイミングで T_{PRI} 毎に逐次時分割で切替えた送信を T_c の間で繰り返す。

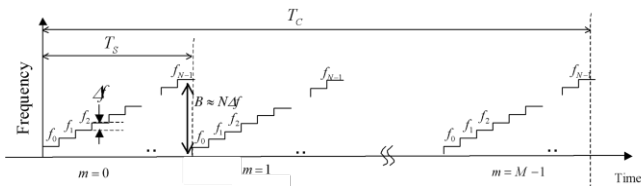


図 2.1 多周波 CW 方式送信シーケンス

ここで、送信波は、簡単のため振幅を 1 とすると、

$$T_n(t) = \exp[j(2\pi(f_n t) + \phi_n)] \quad (1)$$

と書かれる。 ϕ_n は任意の位相である。

目標にあたり反射した送信波は、目標までの往復時間に相当する時間遅延 τ の後、受信波として送受信アンテナに入射する。このとき、受信波は、

$$R_n(t) = \exp\left[j\left(2\pi(f_n + f_{d,n})t - \frac{4\pi f_n}{c}R + \phi_n\right)\right] \quad (2)$$

と書かれる。ここでも簡単のため振幅を 1 とした。ここで $\lambda_n (\equiv c/f_n)$ とすると、 $f_{d,n} (= 2V/\lambda_n)$ はドップラ周波数、 c は光速、 R は時刻 $t=0$ での目標距離である。

この受信波は、送信波 $f_n (n=0,1,\dots,N-1)$ とミキシングされ、観測信号(measurement signal)として、

$$x_n(t) = \exp\left[j\left(2\pi f_{d,n}t - \frac{4\pi f_n}{c}R\right)\right] = \exp\left[j\left(2\pi f_d t - \frac{4\pi f_n}{c}R\right)\right] \quad (3)$$

が得られる。ここで送信周波数に対し各周波数ステップでの周波数 $f_n (= f_0 + n \cdot \Delta f) (n=0,1,\dots,N-1)$ の差 Δf は十分小さく、各周波数ステップでのドップラ周波数は等しいとしている。

$$f_{d,n} (n=0,1,\dots,N-1) \cong f_d \quad (4)$$

同一周波数の繰り返し番号を $m (=0,\dots,M-1)$ とし、サンプリングは各周波数の中間時刻とすると、各サンプリング時刻の実時間 $t_{n,m}$ は、

$$t_{n,m} = T_{PRI}n + T_{PRI}N \cdot m + \frac{1}{2}T_{PRI} \quad (5)$$

である。このときの計測信号モデルは、

$$\begin{aligned} x(n,m) &= \exp\left[j\left(2\pi f_d T_{PRI}(n+N \cdot m) - \frac{4\pi f_n}{c}R + \pi f_d T_{PRI}\right)\right] \\ &= \exp\left[j\left(2\pi f_d T_{PRI}N \cdot m + (2\pi f_d T_{PRI} - \frac{4\pi \Delta f}{c}R) \cdot n - \frac{4\pi f_0}{c}R + \pi f_d T_{PRI}\right)\right] \end{aligned} \quad (6)$$

と書かれる。

なお、地面のような反射点が複数存在するときには、計測信号は式(6)の線形和として書き表すことができる。以下、信号処理構成を説明する。

1) 目標相対速度検出処理

まず各 n に対する m 方向のサンプリング信号をフーリエ変換することで、目標相対速度検出を行う。

すなわち、目標速度検出処理では観測時刻毎得られる計測信号(6)を各 n に対し下式に示す m 方向のフーリエ変換処理を行う。

$$F(n,k) = \sum_{m=0}^{M-1} x(n,m) \exp\left[-2\pi j\left(\frac{m}{M}k\right)\right] \quad (7)$$

ここで、 $k (=0,1,\dots,M-1)$ は周波数チャンネル番号である。式(6)を式(7)に代入した後の振幅値 $|F(n,k)|$ は、

各周波数ステップ n において周波数チャンネル番号、

$$k_{peak} = f_d T_{PRI} MN \quad (8)$$

ではコヒーレント積分となりピークが得られる。

このように、式(7)の出力振幅がしきいピークとなる周波数チャンネル番号 k_{peak} を検出することで、目標ドップラ周波数が得られる。検出した番号 k_{peak} から目標

相対速度 \hat{V} は、

$$\hat{V} = f_d \frac{\lambda}{2} = \frac{k_{\text{peak}}}{T_{\text{PRI}} MN} \frac{\lambda}{2} \quad (9)$$

と得られる。また、 k_{peak} となる周波数チャンネル出力は、

$$F(n, k_{\text{peak}}) \cong \exp \left[j \left(2\pi \frac{k_{\text{peak}}}{MN} - \frac{4\pi\Delta f}{c} R \right) \cdot n - \frac{4\pi\Delta f}{c} R + \pi f_d T_{\text{PRI}} \right] \quad (10)$$

となる。

地面からの反射波は、アンテナ直下以外からの反射波も混信することからフーリエ変換処理を行うと、式(7)の出力振幅には複数のピークが現れることがあり得る。アンテナ直下からの反射波を推定する為に垂直降下時、アンテナ直下からの反射波が持つドップラ周波数が一番高くなることを利用する。得られた出力振幅に対して閾値を設け、閾値を超えたピークに対して一番高周波側に現れるピークの周波数チャンネル番号を選択し目標相対速度とする。

2) 直下高度検出処理

目標距離は周波数ステップにおける検出周波数チャンネル k_{peak} の n 方向への位相勾配から求める。すなわち、 $F(n, k_{\text{peak}})$ を各周波数ステップの時間差に依存し

た検出周波数チャンネルの位相差を補正した、式(11)の n 方向への位相勾配を MUSIC 法などの超分解能法を用い求めることで高度を導出する。

$$\begin{aligned} H(n, k_{\text{peak}}) &= F(n, k_{\text{peak}}) \exp \left[-j \left(2\pi \frac{k_{\text{peak}}}{MN} \right) \cdot n \right] \quad (11) \\ &= \exp \left[j \left(-\frac{4\pi\Delta f}{c} R \right) \cdot n + 2\pi f_d \tau \right] \cong \exp [j\varphi(n, k_{\text{peak}})] \end{aligned}$$

直下高度検出に MUSIC(Multiple Signal Classification)法を使用する。まず多重波環境で超分解能法を用いる前処理として、相関行列のランクを回復させるために周波数平均を行うことが必要である。目標間の速度差は任意連続量であるため、周波数平均の入力はフーリエ変換出力でのピーク周波数番号 k_{peak} チャンネルに限定せず、本稿では周波数番号 k_{peak} とその前後±2チャンネルの合計5チャンネルのデータベクトルを用いることとする。

これらデータベクトルを列ベクトルとする行列 \mathbf{F} に対し、列方向 (n 方向) の N_s 行からなるサブ行列とし

て、

$$\begin{aligned} \mathbf{F}_q &\equiv \text{submatrix}[\mathbf{F}; n = q, q + N_s - 1, k = k_{\text{peak}} - 2, k_{\text{peak}} + 2] \\ &\in \mathbb{C}^{N_s \times 3} \\ q &= 0, \dots, N - N_s \quad (12) \end{aligned}$$

を定義する。ここで、 $\text{submatrix}[\mathbf{X}; n = a, b, k = c, d]$ は、行列 \mathbf{X} の a 行から b 行、 c 列から d 列までの部分行列を表す。

周波数平均とは、このサブ行列 \mathbf{F}_q の部分相関行列の平均処理にて下記の相関行列 \mathbf{R} を求める処理である。

$$\mathbf{R} \equiv \langle \mathbf{F}_q \mathbf{F}_q^H \rangle \in \mathbb{C}^{N_s \times N_s} \quad (13)$$

ここで、 \mathbf{H} は行列の複素転置、 $\langle * \rangle$ は q に関する平均操作を示す。得られた相関行列 \mathbf{R} に対して MUSIC 法を使用し、得られるスペクトルのピーク値に対して目標高度を検出する。

MUSIC 法では、周波数平均後の相関行列 \mathbf{R} (式(13)) の固有展開を行い雑音の固有値に対応する固有ベクトル \mathbf{e}_α ($\alpha = 1, \dots, N_s - L$) からなる雑音空間 $\mathbf{E} = [\mathbf{e}_1 \ \dots \ \mathbf{e}_{N_s - L}]$

を求める。ここで、 L は信号数であり、例えば雑音の固有値より大きな固有値の数から得られる。

次に、MUSIC 法にて目標距離を探索するためのステアリングベクトル $\mathbf{a}(\mathbf{R})$ として式(10)から

$$\mathbf{a}(\mathbf{R}) \equiv \left[\exp \left[j \left\{ 2\pi \left(2\pi \frac{k_{\text{peak}}}{MN} - \frac{2R}{c} \Delta f \right) n \right\} \right] \right] \in \mathbb{C}^{N_s \times 1} \quad (14)$$

を用いる。ここで、 k_{peak} は目標速度検出処理により得られた周波数チャンネル番号であり式(14)では既知量として取り扱うことができる。よって、ステアリングベクトル $\mathbf{a}(\mathbf{R})$ に含まれる未知数は推定対象である距離 R のみである。MUSIC 法ではこのステアリングベクトル $\mathbf{a}(\mathbf{R})$ と前記雑音空間 \mathbf{E} を用いて、

$$\text{MUSIC}(R) = \frac{\mathbf{a}^H(\mathbf{R})\mathbf{a}(\mathbf{R})}{\mathbf{a}^H(\mathbf{R})\mathbf{E}\mathbf{E}^H\mathbf{a}(\mathbf{R})} \quad (15)$$

を評価関数とする。

直下高度検出時、式(15)から得られる評価関数である MUSIC スペクトルには直下反射波と直下周辺反射波に相当する距離成分が現れることがあり得る。機体と地面の相対距離の関係は着陸シーケンスにおける垂直降下時、機体直下からの反射波と直下周辺からの反射波と比較すると機体直下からの反射波が相対的に短くなる。式(15)から得られる MUSIC スペクトルに対し、スペクトル最大強度を基準に閾値を設定し、スペクトルから得られたピークで一番近距離に現れるピーク値を直下高度として導出する。

なお、式(11)の様に多周波 CW 方式は、各周波数ステップの位相差から距離を導出するので、目標物からの反射波が位相回転しても、その値が周波数に依存しなければ、測距への影響は無い。

3. 計算機シミュレーション

本方式の地面に対する高度計測についてフィージビリティ検討を行うためにレーダ直下以外の地面からの反射波も多数混信する多重波環境を想定した計算機シミュレーションを構築した。レーダパラメータ・機体条件及び地面条件に関し表 3.1, 3.2, 3.3 を採用した。

地面の各散乱点からの反射波の電力は式(16)とした。ここで、 G はアンテナゲイン、 λ は搬送波の波長、 s は地面各点の反射断面積、 σ は平均後方散乱係数[7]、 θ は送信波の地面への入射角である。

受信信号は、各反射点の電力値から平均信号振幅を定め、式(2)に乗算しかつ往復の時間遅延を考慮しコヒーレント加算することにより生成した。

$$Pr \propto \frac{G(\theta)^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma(\theta) \cdot s \cdot \cos(\theta)}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad (16)$$

各信号振幅は、レイリー分布に従うものと仮定し[1]、信号振幅、地面モデル、および反射波の生成方法は文献[5]と同様である。

また、2 章で述べたように当方式では搬送波周波数に対する周波数ステップ間の周波数差が小さく、反射点での入射波と反射波の位相変化、およびその角度依存性は無視できる方式であるため、各反射点からの反射波位相は、行路差のみを考慮したモデルとした。

本計算機シミュレーションにおいて、多周波 CW 方式による上記地面モデルに対する着陸高度（高度 10m 以下を想定）からの高度推定評価を行う。高度を固定し高度推定を行い面目標（地面）からの反射波の様子と推定結果について評価と、探査機の高度変化時における高度推定の依存性について評価を行う。今回の計算機シミュレーションに関し、試行回数は条件ごとに 1000 回とした。

表 3.1 レーダパラメータ

送信周波数	24.1125GHz
周波数ステップ数	8
サンプリング周波数	20kHz
周波数ステップ幅（距離視野）	10MHz（約 15m）
周波数切換間隔（速度視野）	50 μ s（約 7.77m/s）
観測時間（速度分解能）	102.4ms（約 0.06m/s）

表 3.2 機体条件

アンテナビーム幅	30deg（チェビシェフパターン）
送信電力	10mW
レーダ高度	3~9m
降下速度	1m/s

表 3.3 着陸地形による地面条件

地面反射点の凹凸分布	約 2.8cm の一様分布
地面反射強度分布	振幅レイリー分布
反射点の後方散乱係数	入射角に依存
距離減衰	R^4
地面反射点のメッシュ	一辺 10cm
地面反射点の計算範囲	一辺 10m

3.1 基本特性評価

多周波 CW 方式による高度推定基本特性を評価するために、探査機の高度を 9m に固定し、速度 1m/s にて降下する状況における高度推定計算機シミュレーションを実施した。なお S/N=30dB となる雑音を付加した。

図 3.1 では、前記した方法により乱数を用いて作成した地面条件のある一例における「目標相対速度検出処理」の結果を示す。図より直下反射波と考えられるドップラ周波数成分（すなわち降下速度 1m/s に相当する）以外に、周辺からの反射波と考えられるドップラ周波数成分(0.9m/s 程度)が現れることが確認される。アンテナビーム幅が広いために、「目標相対速度検出処理」出力には直下反射波と周辺反射波の混信が発生する。

次に「直下高度検出処理」の MUSIC スペクトル出力を図 3.2 に示す。MUSIC を用いているために混信信号の分離が可能となる。図 3.2 では 2 つのピークが観測される。今回の地面条件では概ね 2 つの強い反射点が存在したことが分かる。「直下高度検出処理」では、前記したように最も距離が小さいスペクトルピークを直下高度として採用する。

以上から、高度推定結果にランダム誤差のみならずバイアス性の誤差が発生することが予想される。また、「目標相対速度検出処理」での混信の程度や「直下高度検出処理」におけるスペクトルピーク様相は確率的に発生させた地面条件により変化するために統計的評価が必要である。

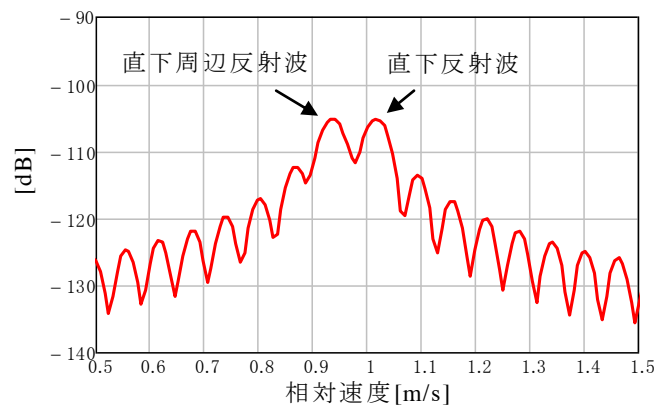


図 3.1 FFT スペクトル

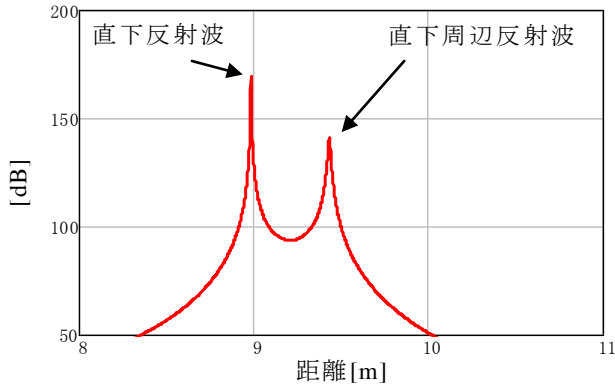


図 3.2 MUSIC スペクトル

図 3.3 に統計的評価結果である高度推定ヒストグラムを示す。ヒストグラムから、直下高度推定結果の平均値、標準偏差はそれぞれ 9.05m, 0.12m が得られ、高度 9m に対して約 0.6% のバイアス誤差及び約 1.3% の標準偏差誤差が発生していることが分かる。

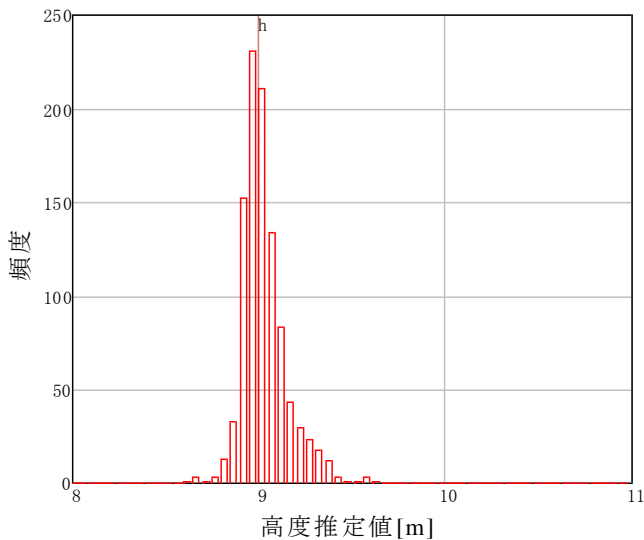


図 3.3 高度推定ヒストグラム

MUSIC を用いることにより、周辺に大きな反射率をもつ場合にも直下成分電力がある程度観測されることで、周辺からの反射に影響されず直下の高度推定の誤差が低減しているものと思われる。

なお時間遅延を測距原理とするパルスドップラ方式においても、時間遅延とともに距離により信号は減衰するがビーム照射円環面積が大きくなるため、反射パルス立上がりは地面条件に左右され、当方式同様に誤差が発生すると考えられる。今後、比較シミュレーションの実施が望まれる。

3.2 推定結果の高度依存性

推定結果の高度依存性を評価するために表 3.2 に示す高度範囲において、高度推定シミュレーションを実施した。なお、高度 3m にて S/N=30dB に相当する雑音を各高度に対して付加している。

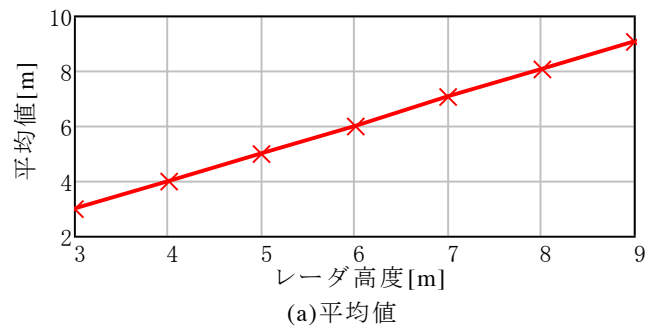
各設定高度に対する平均値と標準偏差結果を表 3.4、

図 3.4 に示す。高度が低下するにしたがい、バイアス誤差、標準偏差誤差ともに小さくなることが分かる。

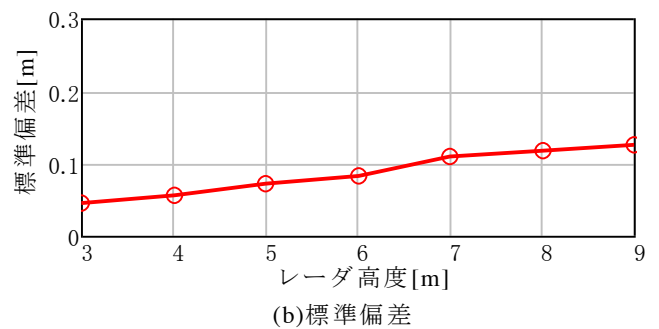
今回のシミュレーション条件では、各高度共にバイアス誤差は約 1% 以内と標準偏差誤差は約 1.4~1.6% の範囲にとどまることが確認された。

表 3.4 高度依存性推定結果

	設定高度 [m]						
	3	4	5	6	7	8	9
平均値 [m]	2.98	4.00	5.01	6.03	7.04	8.05	9.07
標準偏差 [m]	0.05	0.06	0.07	0.08	0.11	0.12	0.13



(a) 平均値



(b) 標準偏差

図 3.4 高度変化推定特性

4. 実験的評価

多周波 CW 方式による地面を対象とした高度計測について実験的に評価を行った。使用した 24GHz 小型レーダ外観図を図 4.1 に示す[8]。レーダパラメータはシミュレーション条件表 3.1 と同様である。

実験は図 4.2 に示すように周囲が開けた場所（運動場）にて本装置をクレーンかご台下部に取り付け、かご台を降下させた時の小型レーダ出力波形を観測・保存し、そのデータを用いてオフラインにて第 2 章で示した多周波 CW 信号処理（計算機シミュレーションと同様のプログラム）を適用し相対速度・直下高度を算出した。

相対速度・直下高度算出結果の一例を、図 4.3 および図 4.4 に示す。「目標相対速度検出処理」結果から、かご台が速度 0.2m/s の速度で降下を開始し、その後は約 0.4~0.5m/s の速度で降下したことが分かる。一方、図 4.4 から、高度は約 7m から順次降下し 1m の低高度

までほぼ安定した直下高度計測結果が得られた。20kHz という低速の A/D を備えた多周波 CW 方式小型レーダにより、実験的に相対速度と高度推定が可能であることが確認された。

図 4.4 から高度真値が不明ではあるものの、計算機シミュレーションで得られた標準偏差とほぼ合致する高度値のゆらぎが見られ、多周波 CW 方式は、着陸最終フェーズのレーダ方式として有効であると思われる。ただし、より多くの実験的評価、またより月面に類似した状況での実験評価が必要である。

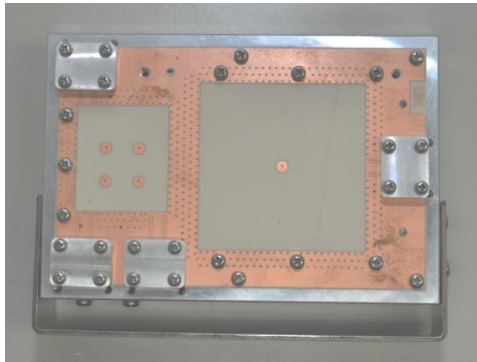


図 4.1 24GHz 小型レーダ外観



図 4.2 実験風景

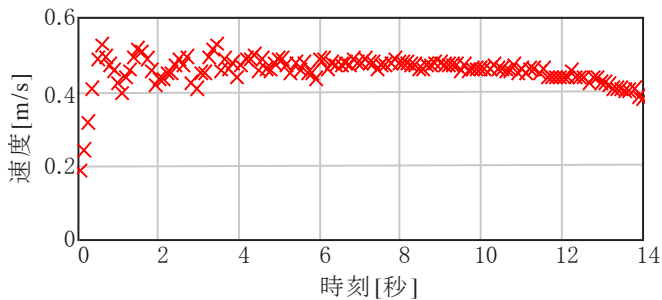


図 4.3 相対速度推定結果

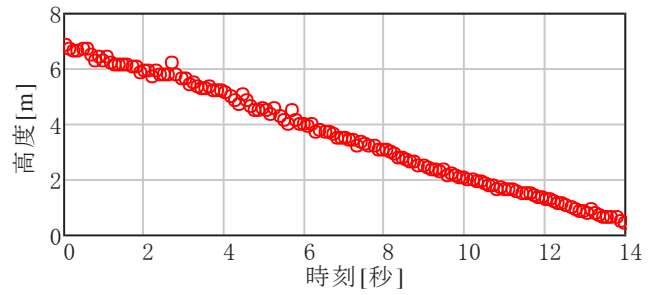


図 4.4 直下高度推定結果

5. おわりに

本稿では、月惑星探査機の着陸誘導最終フェーズで用いる着陸レーダの一方式として、位相情報を用いるレーダ測距方式である多周波 CW 方式を採用し、そのフージビリティスタディを実施した。計算機シミュレーションでは地面に対しての直下高度計測精度（平均値、標準偏差）に関する統計的評価を実施した。また実験により、実際の地面（地上（運動場））に対する速度推定及び直下高度推定評価を行い、実験的にも当方式にて低高度での高度推定が可能であることを確認した。ただし、運動場という均一な平面での実験であるため、より月面を模擬した環境での評価は今後の課題である。また、直下高度反射と周辺からの反射波の速度・距離の分離性能改善を図り直下高度の推定精度を向上させる方式（速度・距離の 2 次元 MUSIC 法等）の研究を進める予定である。

参考文献

- [1] 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, SANE104(469), pp7-12, Nov.2004.
- [2] 福田盛介, 水野貴秀, 坂井智彦, 富田秀穂, 石丸元: 月着陸機搭載用 C 帯パルスレーダの速度測定におけるドップラ周波数への地形の影響に関する検討, 信学技報, SANE107(407), pp19-24, Dec.2007.
- [3] 岸本健児, 坂井智彦, 福田盛介, 岡栄一, 水野貴秀: 月探査機搭載用着陸レーダ BBM における近距離計測について, 信学ソ大, B-2-30, Sep. 2008.
- [4] 岸本健児, 水野貴秀, 鶴岡勉, 坂井智彦, 福田盛介: 月探査機搭載用着陸レーダ BBM における近距離特性の改善, 信学総大, B-2-17, Mar2009.
- [5] 植松大貴, 稲葉敬之: 位相情報を用いる測距法の着陸レーダへの適用, 第 54 回宇宙科学連合講演会, JSASS-2010-4224, Nov2010.
- [6] 稲葉敬之: 多周波ステップ ICW レーダによる多目標分離法”電子情報通信学会論文誌(B), vol.J89-B No.3, pp.373-383, Mar2006.
- [7] Fawwaz T.Ulaby, M.Craig Dobson, "HANDBOOK OF Radar Scattering Statistics for Terrain" Artech House, Boston, 1989
- [8] 中島大輔, 塚田渉, 一色智裕, 稲葉敬之: 24GHz 小型レーダの試作と人物運動計測実験, 信学ソ大, B-2-15, Sep 2011