

2A15 位相情報を用いる測距法の着陸レーダへの適用

○植松大貴, 稲葉敬之 (電気通信大学大学院)

Application of Ranging Method by Using Phase Information to Landing Radar
Hiroki Uematsu and Takayuki Inaba (The University of Electro-Communications)

Key Words: Landing Radar, Multiple Frequency ICW

Abstract

Many of landing radars have adopted FMCW modulation or pulse modulation. The landing radar which is based on ranging technique using phase information, like synthetic bandwidth radar, has rarely been discussed. In this article, we proposed to apply Multiple Frequency ICW radar in final landing approach and evaluated the ranging performance by computer simulation.

1. まえがき

月・惑星へ探査機を安全に着陸させるためのセンサとして着陸レーダの研究・開発が進められている。

従来, 航空機用電波高度計としては, FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave)が多く用いられてきた。しかし, FMCW方式は低速の信号処理で高い距離精度が得られるが, 多目標環境下, すなわち低高度で地面を計測対象とするような場合において, up 掃引と down 掃引での検出周波数ペアリングにおいて誤作動の可能性がある。一方, パルスレーダやパルス圧縮レーダでは, 広帯域受信機と高速サンプリングが必要となるが, 最短時間で反射してきたパルス成分(受信パルス立ち上り)の時間遅延から直下距離が計測可能であり, 現在 JAXA/ISAS にて開発が進められている[1]。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)では送信パルスとのアイソレーション等の問題で距離計測が難しくなるという課題も報告されている[2]。

そこで本論文では位相情報を用いるレーダ方式として, パルスレーダから H/W 追加変更も比較的軽微であり, 近距離計測にも適した多周波ステップ ICW 方式の着陸レーダへの適用を提案する[3]。しかし, 当方式は孤立目標を検出対象として考案したものであり, 着陸レーダのように検出対象が多数の反射点からなる面目標に対する評価はこれまでなされていなかった。本論文では, 計算機シミュレーションにより面目標(月面等地面)に対しての提案方式の評価検討を行う。

2. 多周波ステップ ICW 方式

多周波 CW 方式をパルス化し, 送受信アイソレーション能力を向上させた方式が多周波ステップ ICW 方式である。当方式はパルス化されているものの, パルスレーダと測距原理が異なり, 複数の周波数の位相差から距離を得る方式である。本論文では, 2つの周波数(N=2)を用いる場合は2周波ステップ ICW と呼び, それ以上の周波数を用いる場合を多周波ステップ ICW と呼ぶこととする。

2周波ステップ ICW では, 等相対速度(等ドップラ周波数)の反射体間の距離差計測は原理上困難であるが, 多周波化することにより等相対速度目標の分離性能が向上するという利点を有している。以下多周波ステップ ICW 方式について説明する。

2.1 多周波ステップ ICW 方式における等速複数目標の距離分離法

図 2.1 に送信周波数シーケンスを示す。以下, 多周波ステップ ICW 方式による等速複数目標の距離分離法について説明する。図 2.2 に構成ブロック図を示す。

図 2.2 において Stepped freq. oscillator は, 観測時間 T_c 内でコヒーレント(観測時間内で位相が一定)な

CW 波 f_n ($n = 0, 1, \dots, N-1$) を発生する機能を有し, それらを図 2.1 に示すタイミングで T_{PRI} 毎に逐次切替え出力する。RF-switch では, Stepped freq. Oscillator からの送信波をパルス化(パルス幅 T_w)する。パルス化された送信波はサーキュレータを經由して送受

信アンテナから空間に放射される。

多周波ステップ ICW 方式での計測信号 (measurement signal) モデルを説明するにあたり、簡単のためパルス化していない状況における送受信信号について考える。振幅を 1 とし、送信波は、

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

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、

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

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、サーキュレータを經由して、Down-conversion にて、Stepped freq. Oscillator からの送信波 $f_n (n=0,1,\dots,N-1)$ とミキシングされ、目標が含まれる距離ゲート番号 (すなわち時間遅延 τ) での観測信号 (measurement signal) として、

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

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。

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

次に、送信をパルス化したときの計測信号モデルを考える。パルス繰り返し番号を $m (= 0, \dots, M-1)$ とすると、時間遅延 τ に相当する距離ゲートの実時間 $t_{n,m}$ は、

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

であり、式(3)からその距離ゲートに目標が含まれる

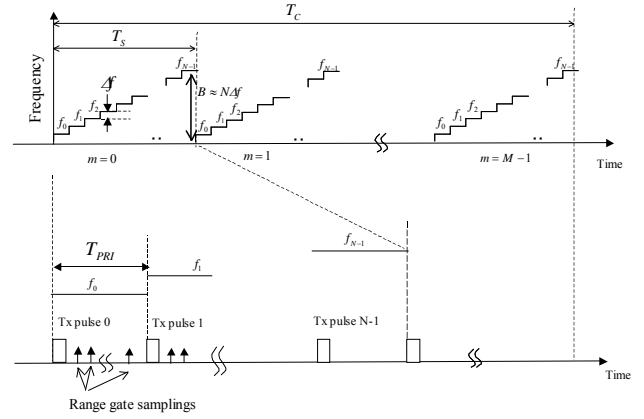


図 2.1 多周波ステップ ICW 方式の送信シーケンス

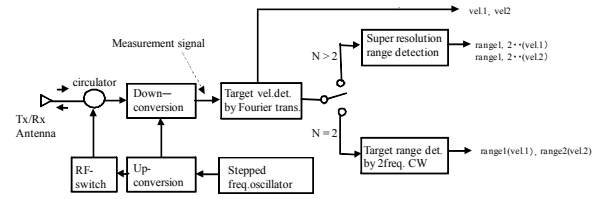


図 2.2 構成ブロック図

ときの計測信号モデルは、

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

$$= \exp\left[j\left(2\pi f_d T_{PRI} N \cdot m + (2\pi f_d T_{PRI} - \frac{4\pi \Delta f}{c} R) \cdot n - \frac{4\pi f_0 R}{c} + 2\pi f_d \tau\right)\right]$$

と書かれる。

同一距離ゲート内に複数目標が存在するときには、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各距離ゲート毎に計測信号(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、

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

と得られる。また、 k_{peak} となる周波数チャンネル出力は、

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

となる。

2) 目標距離検出処理

a) 2周波ステップ ICW 方式 (N=2 とした場合)

2周波ステップ ICW 方式では、周波数ステップ ($n=0$ と $n=1$) における検出周波数チャンネル k_{peak} の位相差から目標距離を求める。すなわち、

$F(n, k_{peak})$ 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、

$$H(n, k_{peak}) = F(n, k_{peak}) \exp \left[-j \left(2\pi \frac{k_{peak}}{MN} \right) \cdot n \right] \quad (11)$$

$$= \exp \left[j \left(-\frac{4\pi\Delta f}{c} R \right) \cdot n + 2\pi f_d \tau \right] \equiv \exp [j\varphi(n, k_{peak})]$$

の位相 $\varphi(n, k_{peak})$ を求め、その位相差から式(12)の様に距離を求める。

$$R = \frac{c}{4\pi\Delta f} [\varphi(0, k_{peak}) - \varphi(1, k_{peak})] \quad (12)$$

b) 多周波ステップ ICW 方式 (N>2 とした場合)

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目標距離を求める。す

なわち、 $F(n, k_{peak})$ 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距離を導出する。

式(11)の様に多周波ステップ ICW 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

本計算機シミュレーションでは、レーダパラメータとして表 3.1 を採用した。また、アンテナのビームパターンを図 3.2 に示す。

探査機の高度、垂直速度をそれぞれ、9m, 3m/s とした時の、距離マップ及び速度マップを図 3.1 に示す。

図 3.1 は、地面 4m 四方 (探査機は図 3.1 の中心から高さ 9m の位置) の各点での探査機との距離と相対速度を示している。ビーム幅内の距離差・相対速度差はそれぞれ約 50cm, 0.15m/s 程度であり、表 3.1 に示したレーダパラメータによる分解能期待値では、直下高度成分を分離できないことがわかる。

そこで、今回の計算機シミュレーションにおいては、地面の反射係数振幅がレイリー分布に従う地面モデルに対し、2周波ステップ ICW および多周波ステップ ICW 方式での距離推定結果のアンテナビーム幅、サンプリング周波数依存性について評価を行う (表 3.1(b) の条件 b1~b3)。また探査機の水平・垂直速度との関係について評価を行う。

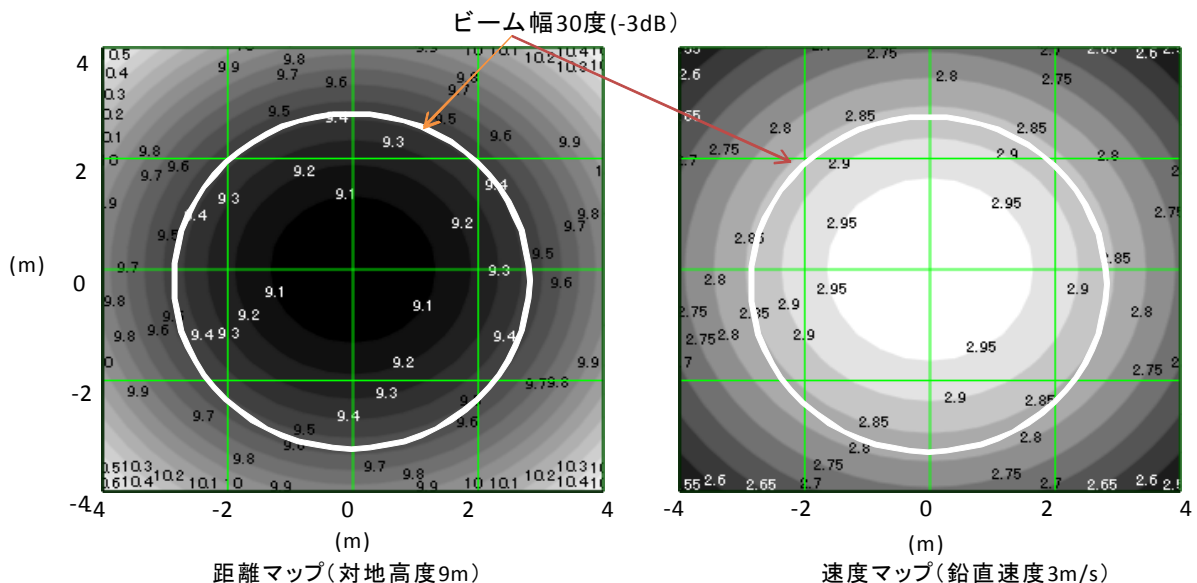


図 3.1 探査機に対する地面の距離、速度マップ

3.1 地面モデル及び反射波の生成方法

地面の各散乱点からの反射波の電力は式(13)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、 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 (式(13)) から平均信号振幅を定め、式(2)に乘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。

$$Pr \propto \frac{G(\theta)^2 \cdot \lambda^2 \cdot \sigma \cdot s \cdot \cos(\theta)}{(4\pi)^3 \cdot R^4} \quad \text{式(13)}$$

なお各信号振幅は、後方散乱係数 σ を平均として分散 1 のレイリー分布に従うものと仮定した[1]。分散 1 のレイリー分布を図 3.3 に示す (0dB が平均値 σ に相当する)。

また、2 章で述べたように当方式では多周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。

表 3.1 レーダパラメータ
(a)

| | |
|------------------------------|-----------------|
| 搬送波周波数 f_0 (波長 λ) | 4.3GHz (7cm) |
| 周波数ステップ数 | 2, 8 |
| 周波数ステップ幅 (距離視野) | 5MHz (30m) |
| パルス幅 (距離分解能) | 15ns (2.24m) |
| PRI | 10us |
| 観測時間 (速度分解能) | 5.12ms (6.8m/s) |

(b)

| 条件 | サンプリング周期 | アンテナビーム幅 |
|----|-----------------|----------|
| b1 | 7.5ns (1.13m) | 30° |
| b2 | 7.5ns (1.13m) | 15° |
| b3 | 1.875ns (0.28m) | 30° |

表 3.2 着陸地形に関するパラメータ

| | |
|----------|-------------------------|
| 地面の凹凸 | 最大 2.8cm(波長比 0.4) の一様分布 |
| 地形の大きさ | 10m 四方 |
| 散乱点の配置間隔 | 10cm |

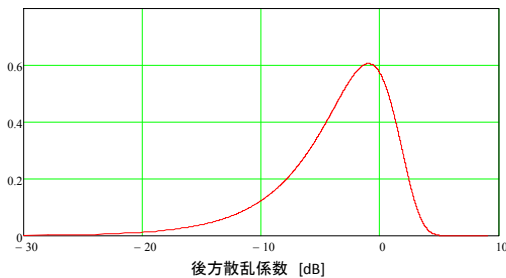
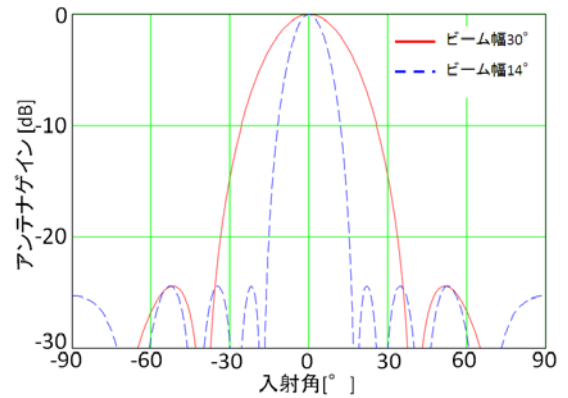


図 3.3 レイリー分布の確率密度関数 (分散 1)



3.2 静止状態での性能評価

探査機の高度を 9m に固定し、速度の影響を除外するために探査機が静止している環境下で計算機シミュレーションを行った。なお、計算機シミュレーションの各条件での試行回数は 500 回とし、面目標に対する基本性能評価を目的とし雑音は付加しないものとした。

高度推定結果の平均値および標準偏差を表 3.3 に示す。2 周波数ステップ ICW、8 周波数ステップ ICW の両方式において、A/D のサンプリング周波数が高く、アンテナビーム幅が狭い方が、標準偏差が小さくなり、平均値も高度の真値に近づき推定精度が向上している事が分かる。

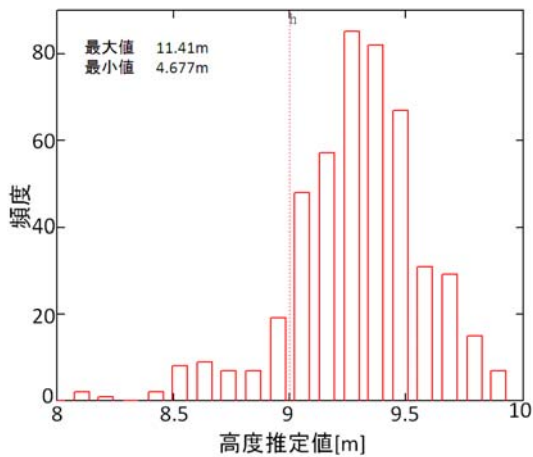
また、全体的に高度推定値が + 方向にバイアスしている。このバイアス誤差の理由は、直下よりも時間遅延が同じある同心円状環からの反射信号が支配的となるためであると考えられる。このため、ビーム幅を狭めた場合や、直下高度の真値の近くをサンプリングした場合 (サンプリング周期を高速にする) 直下からの信号成分が支配的になり、推定精度が向上したと考えられる。

2 周波数ステップ ICW と 8 周波数ステップ ICW 方式とを比較すると、平均値は変わらないが、標準偏差は 8 周波数ステップ ICW 方式の方が小さく 8 周波数ステップ ICW 方式の方が推定精度が良い事が分かる。

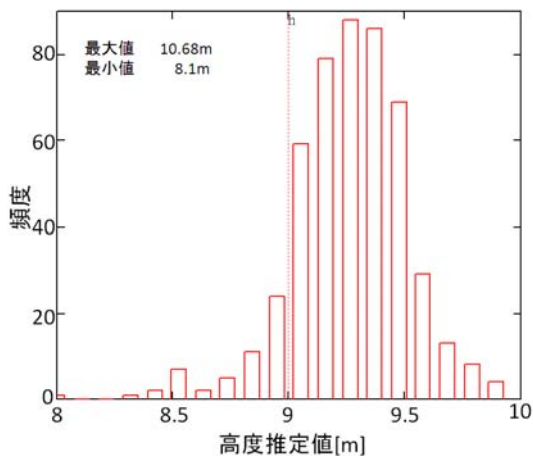
表 3.3 静止環境下での高度推定結果

| 条件 | 2 周波 STEP ICW | | 8 周波 STEP ICW | |
|----|---------------|----------|---------------|----------|
| | 平均値 [m] | 標準偏差 [m] | 平均値 [m] | 標準偏差 [m] |
| b1 | 9.35 | 0.47 | 9.39 | 0.29 |
| b2 | 9.08 | 0.22 | 9.08 | 0.12 |
| b3 | 9.18 | 0.39 | 9.16 | 0.17 |

表 3.3 における条件 b1 時の、2 周波ステップ ICW および 8 周波ステップ ICW 方式の高度推定結果のヒストグラム、およびその最大値、最小値を図 3.4 に示す。標準偏差はそれぞれ 0.47m、0.29m であるが、両方式ともに高度推定誤差が 1m 以上の大きな値をとる場合が稀に発生している。



(a)2 周波ステップ ICW 方式



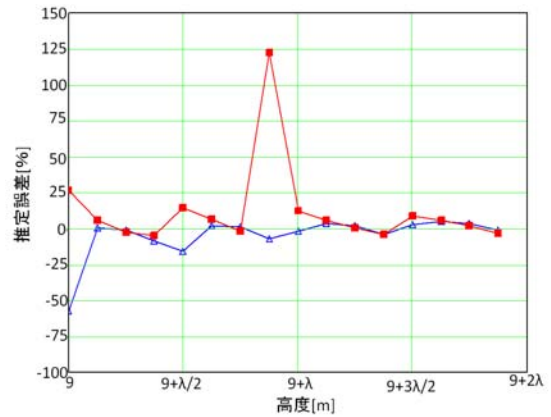
(b)8 周波ステップ ICW 方式

図 3.4 高度推定結果のヒストグラム(条件 b 1)

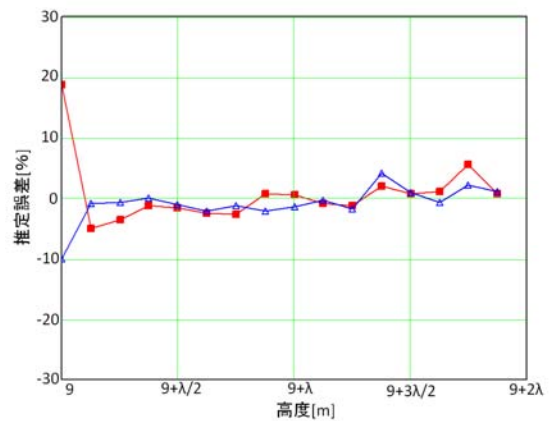
提案方式は、周波数間の位相差から距離を求めているために、このような大きな誤差はある特定の地面条件と高度との関係においてのみ発生し、同じ地面状況（ある凹凸とレイリー分布反射振幅）においても、探査機の高度が少し変わることによって、誤差が変化すると考えられる。このため、図 3.4 の最大、最小値が出現した場合の地面条件下において、探査機の高度を $9 \sim 9+2\lambda$ (m) と変化させた時の高度推定誤差を求めた。結果を図 3.5 に示す。横軸は探査機高度、縦軸は探査機高度に対する相対誤差である。

また、□赤が 9m で最大値となった地面条件、△青が最小値となった地面条件での結果である。2 周波ス

テップ ICW 方式では、高度 9 m の時よりも誤差が増大する場合もあるが、全体としては高度が変わることによって誤差が低減している事が分かる。このことから、レーダ計測値に適切な追尾フィルタを付加することが有効であると考えられる。



(a)2 周波ステップ ICW 方式



(b)8 周波ステップ ICW 方式

図 3.5 高度に対する誤差の変化 (条件 b 1)

3.3 速度依存性の評価

探査機の水平方向の運動による影響を評価するために表 3.4 のパラメータを与え、提案方式の垂直・水平速度依存性を計算機シミュレーションにより確認した。なお、アンテナビーム幅等の条件は表 3.1 の b1 とした。

表 3.4 探査機の運動諸元

| | |
|------|-----------|
| 垂直速度 | 0,3,6 m/s |
| 水平速度 | 0,2,4 m/s |
| 高度 | 9m |

高度推定結果の平均値及び標準偏差を表 3.5 に示す。高度推定結果の平均値は 2 周波、8 波共に速度に対しての変化が少ない。標準偏差に関しては、8 周波ステップ ICW 方式では、速度に対する変化が少ない

が、2周波パルス方式では水平速度が上がるにつれ、標準偏差が小さくなっている。これは水平方向に探査機が運動している場合、垂直方向と比較して、反射点間の速度差が大きくなるので、垂直方向への運動のみの場合と比べ多重波の程度が緩和されたためだと考えられる。

表 3.5 速度に対する高度推定結果
(a)2周波ステップ ICW

| 平均値[m] | | 水平速度[m/s] | | |
|---------------|---|-----------|------|------|
| | | 0 | 2 | 4 |
| 垂直速度 [m/s] | 0 | 9.35 | 9.38 | 9.37 |
| | 3 | 9.36 | 9.38 | 9.38 |
| | 6 | 9.36 | 9.37 | 9.36 |

| 標準偏差[m] | | 水平速度[m/s] | | |
|---------------|---|-----------|------|------|
| | | 0 | 2 | 4 |
| 垂直速度 [m/s] | 0 | 0.47 | 0.37 | 0.32 |
| | 3 | 0.44 | 0.37 | 0.31 |
| | 6 | 0.44 | 0.35 | 0.31 |

(b)8周波ステップ ICW

| 平均値[m] | | 水平速度[m/s] | | |
|---------------|---|-----------|------|------|
| | | 0 | 2 | 4 |
| 垂直速度 [m/s] | 0 | 9.34 | 9.33 | 9.33 |
| | 3 | 9.33 | 9.32 | 9.32 |
| | 6 | 9.33 | 9.33 | 9.31 |

| 標準偏差[m] | | 水平速度[m/s] | | |
|---------------|---|-----------|------|------|
| | | 0 | 2 | 4 |
| 垂直速度 [m/s] | 0 | 0.29 | 0.28 | 0.26 |
| | 3 | 0.28 | 0.27 | 0.25 |
| | 6 | 0.27 | 0.27 | 0.24 |

4. おわりに

本稿では、着陸レーダ用変調方式として多周波ステップ ICW 方式を提案し、計算機シミュレーションにより面目標（地面）に対しての高度計測精度（平均値、標準偏差）に関する評価を実施した。その結果、今回のレーダパラメータ条件設定ではビーム幅が 30deg（または 15deg）と広いにも関わらず、0.1m～0.4m 程度のバイアス誤差と、0.1m～0.3m 程度の標準偏差値にて高度推定が可能であることが分かった。また、当然であるがビーム幅は狭い方が、更に位相差から距離を求める当方式においてもサンプリング周波数は高い方が精度が向上することを確認できた。

多周波ステップ ICW 方式は面目標に対しても、2周波ステップ ICW 方式より推定精度が良いことが確

認された。今後、地面条件を変化させた場合の特性評価、ならびに実際のレーダ装置を用いて実験的検証を実施予定である。また、面目標を対象とした多周波ステップ ICW 方式の信号処理法の改善についても検討を進めたい。

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, Nov2004.
- [2] 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, 電子情報通信学会総合大会, B-2-17, Mar2009.
- [3] 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.
- [4] Mustafa Rangwala, Feinian, Wang, Kamal Srabandi : Study of Millimeter-Wave Radar for Helicopter Assisted-Landing System, IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol.50, No.2, pp.13-25, April 2008