

# スペースデブリレーダを用いた高速な信号検出法及び軌道推定法の開発

磯田健太郎<sup>†</sup> 阪本 卓也<sup>††</sup> 佐藤 亨<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> 京都大学大学院 情報学研究科 〒606-8501 京都府京都市左京区吉田本町

E-mail: †isoda@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp, ††t-sakamo@i.kyoto-u.ac.jp, †††tsato@kuee.kyoto-u.ac.jp

あらまし 近年, スペースデブリが宇宙環境問題となっており, その分布や軌道等を把握することが重要である. 本研究では, 岡山県上齋原村に設立された KSGC レーダを用いたデブリの検出及び軌道推定法の開発を行う. デブリの短時間の運動を等速直線運動と近似し, 評価関数の準周期性を利用した同相積分により信号対雑音比及び軌道推定精度を大幅に改善した. 実データに雑音を加えたデータに対し, 提案法を用いて, 距離及びドップラ速度を予報値に対してそれぞれ 89 m, 21 m/s の精度で推定可能であることを示す.

キーワード スペースデブリ, 準周期性, 同相積分, 軌道推定, KSGC レーダ

## Development of a Fast Signal Detection and Orbit Estimation Algorithm for Space Debris Radar

Kentaro ISODA<sup>†</sup>, Takuya SAKAMOTO<sup>††</sup>, and Toru SATO<sup>†††</sup>

<sup>†</sup> Graduate School of Informatics, Kyoto University Yoshida-honmachi, Sakyo-ku, Kyoto, 606-8501 Japan

E-mail: †isoda@aso.cce.i.kyoto-u.ac.jp, ††t-sakamo@i.kyoto-u.ac.jp, †††tsato@kuee.kyoto-u.ac.jp

**Abstract** Space debris are regarded as a space environment problem now, so that it is important to investigate their distributions and orbits. In this paper, we propose a signal detection and orbit estimation algorithms for KSGC radar located at Kamisaibara, Okayama Pref. in Japan. We approximate the motion of space debris as uniform motion within a short time, and improve the Signal to Noise-Ratio with a coherent integration. This method also improves the orbit estimation accuracy. The proposed method utilizes the quasi-periodicity of the evaluation function in order to effectively estimate the orbit. We applied the proposed method to the real data observed by KSGC radar. We show that our method can estimate the orbit with the errors of 89 m for the range and 21 m/s for the Doppler velocity, respectively.

**Key words** space debris, quasi-periodicity, coherent integration, orbit estimation, KSGC radar

### 1. ま え が き

現在, 地球周回軌道上には総計 2,000 t 以上の人工物体が存在し, その 95 % は役目を終えた人工衛星やロケットの破片など不要物体である [1]. それらはスペースデブリ (以下デブリ) と呼ばれ, その数は直径 1 mm 以上のもので 350 万個以上あるといわれている [2]. そのため, 既存の衛星や国際スペースステーション (ISS) 等に衝突する恐れがあり, 宇宙環境問題となっている. 高度 500 km の円運動を考えると, 速度は約 7 km/sec, 衝突時の平均相対速度は 10 km/sec に達し, また運動エネルギーは速さの 2 乗に比例するため, 衝突時には甚大な被害を及ぼすことが懸念される. そのため, 衝突を回避するためにデブリの軌道を正確に把握することは必要不可欠である. 米国においては, 大きさ約 10 cm 以上のデブリを複数のレーダや光学装

置を用いて観測, 軌道決定を行いカタログ化している [3].

我が国では, 2004 年岡山県上齋原に日本初のスペースデブリ観測専用レーダ, Kamisaibara Space Guard Center Radar (KSGC レーダ) が日本宇宙フォーラムによって設立され観測を開始している. 表 1 に KSGC レーダの主要諸元を示す. KSGC レーダでは, フェイズドアレイアンテナによる電子ビーム走査と機械軸駆動により追尾性能が向上しており, 単一のレーダを用い一回の観測パスで次にデブリを再捕捉するための情報を得ることができる. また, 時分割制御により最大 10 個のデブリを同時に観測し, 追尾することが可能である.

衝突時の危険性を考慮すると, 直径約 1 cm 以上のデブリについては現在の技術では防御不可能であり, 定常的な観測が必要である. KSGC レーダの検出限界は距離 600 km でレーダ散乱断面積 (RCS) 1 m<sup>2</sup> であるが, 将来は直径 1 cm 程度のデブ

表 1 KSGC レーダ主要諸元

Table 1 Main Parameters of the KSGC Radar

Parameters	Value
Location	Kamisaibara, Okayama, Japan (35.31°N, 133.94°E)
Radar System	Active Phased Array
Antenna Size	2.8 m × 2.8 m
Number of Elements	1,395
Gain	38.4 dB
Peak Output	96 kW (69 W × 1,395)
Polarization	Vertical
Center Frequency	3,265 MHz
Beam Width	1.9°
Range Resolution	225 m
Band Width	800 MHz
Pulse Length	200 or 300 μsec

りまで観測できる施設の設備が必要である。本稿では、デブリからの微弱な信号を短時間で検出し、軌道を高精度に推定することにより検出感度を向上させるアルゴリズムを提案する [4] ~ [6]。

## 2. 線形チャープ方式のパルス圧縮

KSGC レーダでは、遠距離の目標を高い分解能で観測するために線形チャープ方式のパルス圧縮が採用されている。送信信号を  $s(t)$ 、同期検波後の受信信号を  $r(t)$  とすると、それらは式 (1), (2) で表される。

$$s(t) = A(t) \exp\left(-j2\pi \frac{B}{2T} t^2\right) \quad (1)$$

$$r(t) = s(t - t_d) \exp[-j2\pi\{f_d(t - t_d) - f_c t_d\}] \quad (2)$$

ここで、 $A(t)$ ,  $T$ ,  $B$ ,  $t_d$ ,  $f_d$ ,  $f_c$  はそれぞれ、窓関数、パルス幅、周波数帯域幅、遅延時間、ドップラ周波数、中心周波数である。受信信号に単位インパルス応答  $h'(t)$  が式 (3) で表される整合フィルタを適用し、遅延時間を得ることができる。

$$h'(t) = s^*(-t) \quad (3)$$

この時、パルス圧縮率は  $P = BT$  で表され、距離分解能は  $1/P$ 、ピーク電力は  $P$  倍改善される [7]。

図 1 にパルス圧縮の模式図を示す。 $s(t)$ ,  $r(t)$  がそれぞれ送信信号、受信信号を表しており、受信信号に対し、送信信号と逆の周波数特性を持った整合フィルタ  $h'(t)$  を時間軸上で畳み込むことで遅延時間を得る。しかし、受信信号にドップラ周波数が存在するため、得られた遅延時間には誤差  $t_l = f_d T / B$  が生じる。そのため、整合フィルタにもドップラ周波数を考慮した  $h(t) = h'(t)e^{-j\omega_d t}$  を畳み込むことで正確な遅延時間を得ることができる。また、フィルタに考慮するドップラ周波数が真値のとき、フィルタの応答も最大となるため、式 (4) に従って  $f_d$ ,  $t$  を推定することができる。

$$\max_{f_d, t} \left| \int r(\tau) h(t - \tau) d\tau \right|^2 \quad (4)$$

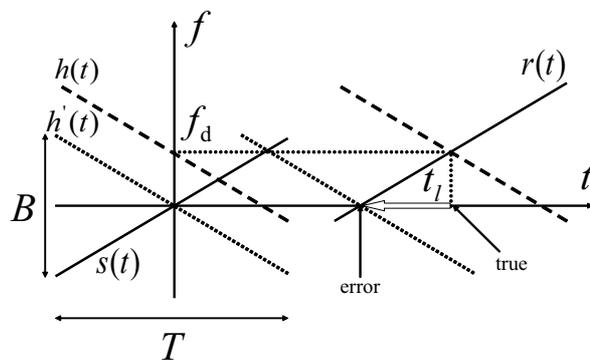


図 1 線形チャープ方式のパルス圧縮

Fig. 1 Linier-Chirp Pulse Compression.

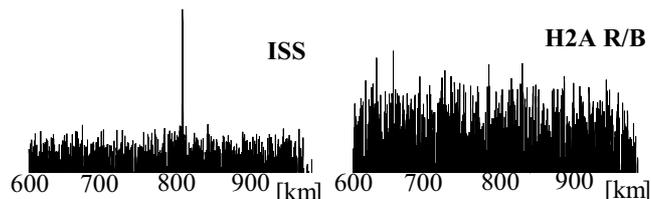


図 2 実データにパルス圧縮を適用した結果

Fig. 2 Result of Pulse Compression Applied to the Real Data.

実データに対しパルス圧縮を行った結果を図 2 に示す。左図、右図はそれぞれ ISS, H2A ロケットブースタ (H2A-R/B) からのエコーで、RCS はそれぞれ  $388.64 \text{ m}^2$ ,  $27.1 \text{ m}^2$  である。ISS は RCS が十分大きいので、信号が検出されているが、ロケットブースタは検出困難であることがわかる。そのため、RCS の小さな目標からのエコーを検出するには信号対雑音比 (SNR) の改善が必要である。

## 3. 運動モデルを仮定したコヒーレント積分

前節で述べたとおり、RCS の小さいデブリを検出するには、SNR を改善する必要がある。本稿では受信信号に対しコヒーレント積分を適用することでそれを実現する。しかし、デブリ観測において目標までの距離、ドップラ速度、運動方向が未知の状態ではコヒーレント積分が困難である。本節ではデブリの運動を単純なモデルで近似することでこれを解決する。

デブリの運動は、人工衛星等と同じく地球の重心を焦点の一つとする楕円運動であるが、短時間では等速直線運動と近似できる。アンテナとデブリの軌道を含む平面内において、デブリの軌道を等速直線運動と仮定し、座標系を考える。図 3 にシステムモデルを示す。デブリの距離変化は

$$r_d(t) = \sqrt{r_1^2 - 2r_1 v_d t + \left(\frac{v_d}{\cos \phi}\right)^2 t^2} \quad (5)$$

で表される。但し、 $(r_1, v_d, \phi) = \mathbf{x}$  はそれぞれ、コヒーレント積分に用いる複数パルス中、1 パルス目のデブリまでの距離、ドップラ速度、デブリの軌道とアンテナとデブリの間の成す角とする。

式 (5) に従い、コヒーレント積分を行い、その電力が最大となる  $\mathbf{x}$  を探索することで、デブリの軌道推定を最適化問題に帰

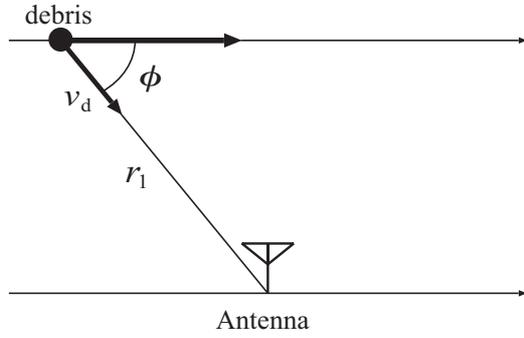


図3 システムモデル  
Fig.3 System Model.

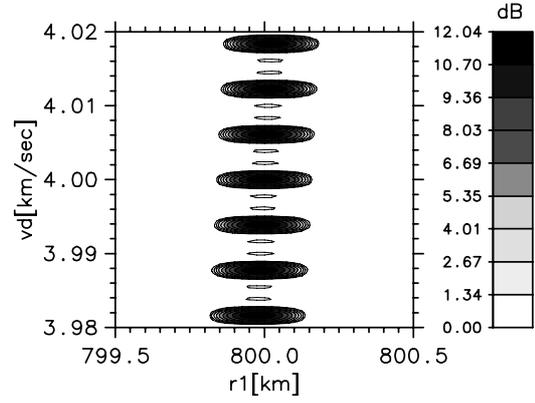


図4 評価関数 ( $N = 4\text{HIT}$ )  
Fig.4 Evaluation Function.

着できる．式 (6) に評価式を示す．

$$\max_x \left| \sum_{i=1}^N \int r_i(\tau) h_i(t_i - \tau) d\tau \cdot e^{-j(\omega_i t_i - \theta_i)} \right|^2 \quad (6)$$

但し,  $r_i(t)$ ,  $h_i(t)$ ,  $N$  はそれぞれ,  $i$  パルス目の受信信号,  $i$  パルス目のドップラ周波数を考慮した整合フィルタ, 積分回数である．また,  $t_i$ ,  $\omega_i$ ,  $\theta_i$  ( $i = 1, \dots, N$ ) は,  $x$  によって一意に決まる値であり, それぞれ,  $i$  パルス目の遅延時間, ドップラ周波数補正量, 位相補正量である．

図4に $\phi$ が真値における評価関数を示す．真値は $x = (800 \text{ km}, 4.0 \text{ km/sec}, 60^\circ)$ で, パルス送出間隔 (IPP), パルス幅はそれぞれ,  $7,500 \mu\text{sec}$ ,  $300 \mu\text{sec}$ である．この評価関数には2つ特徴がある．一つ目は,  $r_1$ ,  $v_d$ の間に相関関係がある．これは第2節で述べたように, 線形チャープ方式のパルス圧縮による距離と周波数の相関であり, 相関の傾きは $a = B/f_c T$ で表される．二つ目は,  $v_d$ 方向に周期的な多数の準最適解が存在する．この理由は, 仮定するドップラ速度が真値とは異なった場合でも, 位相補正の結果, 隣接パルス間の位相が揃えばコヒーレント積分が可能なのである．そのため, その周期はパルス送出間に半波長進むドップラ速度分になり, 周期を $v_{d0}$ と定義すると式(7)で表される．

$$v_{d0} \simeq \frac{\lambda}{2T_{\text{IPP}}} \quad (7)$$

但し,  $\lambda$ ,  $T_{\text{IPP}}$ はそれぞれ搬送波の波長, パルス送出間隔である．KSGCレーダの場合,  $\lambda = 9.18 \text{ cm}$ ,  $T_{\text{IPP}}$ は5–10 msecであるため,  $v_d$ をmm/secオーダで探索する必要があり, 現実的ではなく, 効率的に軌道パラメータを最適化するアルゴリズムが必要とされる．本稿では, 評価関数の大域最適解を探索するため, 信号検出法と軌道推定法の2つに分けて説明する．

#### 4. 評価関数の準周期性を利用した高速信号検出法

信号検出法の目的は, 軌道パラメータを正しく推定できていなくても, 信号の検出を高速に行うことである．多数の準最適解の内一つを, 効率的に探索するアルゴリズムが必要である．

ここで, 高速な信号検出を, 2つの段階に分けて説明する．1つ目は,  $r_1$ ,  $v_d$ 間の相関関係を利用する処理である．図5に信号検出法の模式図を示す．図のとおり相関方向の直交方向

を $u$ 軸, 相関方向を $w$ 軸と定義する． $w$ 方向に強い相関関係があるので, 大域最適解がわかっていなくても,  $u$ 軸方向に探索することで, 評価関数が高い所を効率的に見つけることができる．

2つ目は, 全隣接パルス間の位相差を調整する $\delta v_d$ を導入する処理である．準最適解近傍で,  $x$ が準最適解からずれることによる評価値の低下の要因は, 式(6)において, 整合フィルタ $h_i(t)$ に考慮するドップラ周波数誤差による圧縮損失, 遅延時間 $t_i$ の誤差, 周波数補正量 $\omega_i$ の誤差, 位相補正量 $\theta_i$ の誤差が挙げられる．この中で影響が最も大きいのは $\theta_i$ の誤差である．位相補正量は $\theta_i = \omega_c(t_i - t_1)$ で表される．KSGCレーダでは $f_c = 3,265 \text{ MHz}$ で, 波長は約9.18 cmであるため,  $c(t_i - t_1)/2$ に約4.6 cm誤差が生じるだけで, 逆位相で加算されているためである．但し $c$ は光速である．この位相の影響と比較すると, その他の低下要因は準最適解近傍では十分無視できる．

更に式(6)の位相補正量 $\theta_i$ を検討した結果,  $\theta_i$ を決定する $x$ の内,  $v_d$ が支配的であることが経験的にわかっており,  $v_d$ を微調整することで, 全隣接パルス間の位相差を補正することができる．評価関数の $v_d$ 方向の周期は式(7)で表されるので,  $v_{d0}$ に従い,  $\theta_i$ のドップラ速度を式(8)に分割する．

$$v_d = n v_{d0} + \delta v_d \quad (8)$$

但し,  $n$ は整数で,  $|\delta v_d| \leq v_{d0}/2$ であり,  $n v_{d0}$ ,  $\delta v_d$ をそれぞれ, 大域的ドップラ速度, 局所的ドップラ速度と定義する．大域的ドップラ速度はデブリの軌道を決定, 局所的ドップラ速度は隣接パルス間の位相差を決定するドップラ速度である．図6に $r_1$ ,  $\phi$ が真値での $n v_{d0}$ ,  $\delta v_d$ 空間の評価関数を示す．元来1次元であるドップラ速度を2次元に分割することで図4の評価関数を, 図6のように滑らかにつなぐことができる．

$u$ 軸方向に探索しながら,  $\delta v_d$ 軸を1周期探索することにより, 多数の準最適解の中の一つを見つけ出すことができる．以下に提案信号検出法のアルゴリズムを示す．但し,  $\Delta u$ は距離分解能 $\Delta r$ を $u$ 軸に投影した量であり,  $\Delta u = \Delta r \sin \alpha$  ( $\alpha = \tan^{-1} a$ )である． $\Delta v_d$ は図4において, 準最適解の $v_d$ 方向の半値幅である．

- (1) 予報値  $x_{\text{exp}}$  から探索範囲を定める． $i \leftarrow 1$
- (2)  $i$  が奇数なら (3) へ，偶数なら (4) へ．
- (3)  $x$  を  $x_{\text{exp}}$  から  $+u$  方向に  $\frac{\Delta v_d}{2} \frac{i-1}{2}$  進める．(5) へ．
- (4)  $x$  を  $x_{\text{exp}}$  から  $-u$  方向に  $\frac{\Delta v_d}{2} \frac{i}{2}$  進める．(5) へ．
- (5)  $\delta v_d$  軸をステップ幅  $\Delta v_d$  で， $|\delta v_d| \leq v_{d0}/2$  間探索し，最大値を  $E$  とする．
- (6)  $E$  が閾値を超えていれば，検出．そうでなければ  $i \leftarrow i+1$  として (2) へ．

提案信号検出法の計算時間を評価する．評価値を 1 点計算するのに要する時間を  $k$  とすると， $v_d$  軸方向に  $i$  個探索する計算時間は  $ki$  である．提案法では， $v_d$  軸方向の探索を位相回転により行うため，フィルタリング処理を必要としない．そのため， $v_d$  軸方向に  $i$  個探索する計算時間はほぼ  $k$  のままである．よって計算時間の改善度は  $i$  となる． $v_d$  軸方向に 1 周期  $v_{d0}$  探索するには， $\Delta v_d$  を用いて  $i = 2v_{d0}/\Delta v_d$  点探索する必要がある． $N = 16$ ， $T_{\text{IPP}} = 7.500 \mu\text{sec}$  とした場合， $\Delta v_d$ ， $v_{d0}$  はそれぞれ  $0.1695 \text{ m/sec}$ ， $6.1213 \text{ m/sec}$  であるので  $i = 72$  となり，単純に  $v_d$  を更新する手法に比べて，計算時間は 72 倍高速化される．

提案法の優位性を明らかにするため，実データに雑音を加え，そのデータに対し提案信号検出法を適用する．第 1 節で述べたように，KSGC レーダの検出限界は距離 600 km で，RCS  $1 \text{ m}^2$  の目標である．今回用いるデータは，2005 年 3 月 2 日に観測された H2A-R/B からのエコーで，RCS は  $27.1 \text{ m}^2$  である．今回は軌道予報値から，目標の距離が大まかに 895 km とわかっている．レーダ方程式より，距離 600 km，RCS  $1 \text{ m}^2$  の目標からの信号強度は，距離 895 km，RCS  $4.95 \text{ m}^2$  と等価である．この距離において，H2A-R/B は検出限界より 5.47 倍大きいので，ガウス雑音を実データに加え検出限界と検出困難な同等の状況にした．このデータを擬似実データと呼ぶ．

図 7 に擬似実データに提案信号検出法を適用した結果を示す．破線は単一パルスを用いた手法であり，このとき整合フィルタに用いたドップラ周波数は，予報値を用いてある．実線は提案信号検出法の適用結果である．またこの図では雑音レベルを 0 dB としている．上図は観測距離範囲を示した図であり，提案法により信号が顕著に検出されていることがわかる．下図はその拡大図であり，単一パルスに比べて SNR が約 10.45 dB 改善していることがわかる．しかし，このとき得られた軌道パラメータは大域最適解とは限らない．そのため，検出時の軌道パラメータから大域最適解を探索するアルゴリズムが必要である．

## 5. 準周期性を利用した効率的軌道推定法

前節で，提案信号検出法で得られた軌道パラメータを  $x_{\text{det}}$  と定義する．軌道推定法では， $x_{\text{det}}$  を初期値として大域最適解を探索する．単純な手法として，周期  $v_{d0}$  ずつ  $w$  軸方向に  $x$  の更新を繰り返す手法がある．しかし，各準最適解間の周期  $v_{d0}$  はドップラ速度変化の非線形性により，僅かに変化しており，評価関数には準周期性が存在する．式 (7) は，視線方向の等速直線運動を仮定した場合に成り立つ．図 8 の破線にこの手法の模式図を示す． $x_{\text{det}}$  から， $w$  軸方向に  $v_{d0}$  ずつ  $x$  の更新を繰り返す

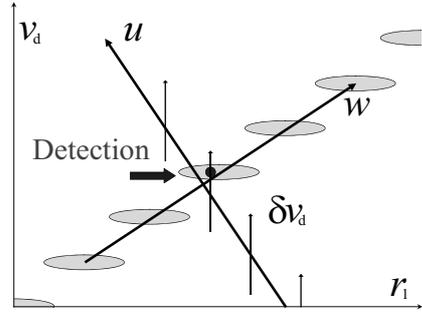


図 5 提案信号検出法模式図

Fig. 5 Model of the Proposed Detection Method.

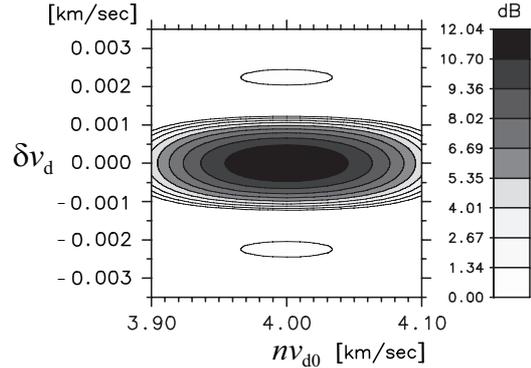


図 6 大域的ドップラ速度と局所的ドップラ速度

Fig. 6  $nv_{d0}$  and  $\delta v_d$ .

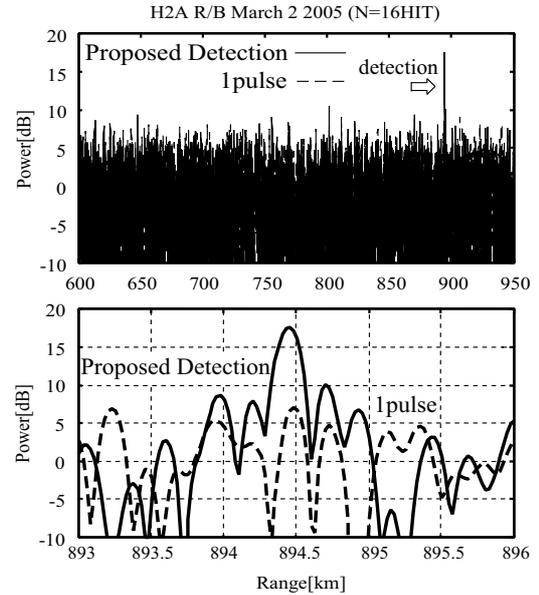


図 7 提案信号検出法適用結果

Fig. 7 Result of Proposed Detection Method Applied to the Pseudo Real Data.

返しても，評価関数の準周期性の影響で，更新後の  $x$  が各準最適解から僅かにずれていき，最終的に得られる軌道パラメータの精度は十分でない．

高精度に軌道パラメータを求めるために， $x_{\text{det}}$  から  $w$  軸方向に  $v_{d0}$  相当進み，順次局所最適化を繰り返していく手法がある．図 8 の実線はこの手法の模式図である．この手法では，大

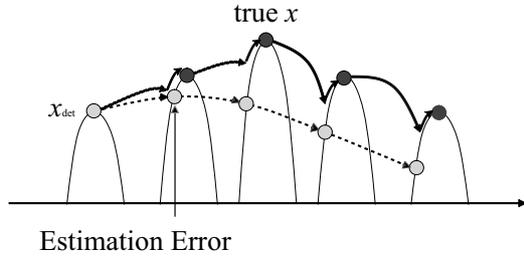


図 8 準周期問題

Fig. 8 Quasi-Period Problems.

表 2 検出, 軌道推定パラメータと予報値

Table 2 Comparison of the Detection, the Orbit estimation and the Expected Parameters

	$r_1$ [km]	$v_d$ [km/s]	Gain [dB]
Detection	894.450	3.155	17.57
Estimation	894.549	3.235	17.74
Expected	894.460	3.256	

域最適解を求めることが可能であるが, 局所最適化を行う際,  $x$  を更新する度フィルタリング処理を繰り返すため, 計算に要する時間が長くなる. そのため, 新しい軌道推定法を提案する.

提案軌道推定法でも前節で導入した  $\delta v_d$  を用いる. ドップラ速度方向に局所最適化を行う場合,  $x$  の  $v_d$  を更新しフィルタリング処理を繰り返す代わりに,  $\delta v_d$  の最適化を行う.  $\delta v_d$  の更新は, 各パルスの位相を変化させることに相当するため, フィルタリング処理を繰り返す手法に比べて計算負荷が軽減される. またこのときの, ドップラ速度推定誤差は  $10^{-8}$  km/sec と十分小さい.

以下に提案軌道推定法のアルゴリズムを示す. 図 9 に提案軌道推定法の模式図を示す.

- (1)  $x \leftarrow x_{det}$
- (2)  $x$  を  $v_{d0}$  分  $w$  軸方向に更新する.
- (3)  $\delta v_d$  のみをパラメータとして 1 次元最適化.
- (4)  $v_d \leftarrow v_d + \delta v_d$ .  $r_1$  を 1 次元最適化.
- (5) 前後数点の最適解の評価値を比べ, 極大値であれば推定終了, そうでなければ (2) へ.

また, 提案法を用いることにより, 繰り返しフィルタリング処理を行い局所最適化を行う手法に比べて計算時間は 1/10 以下に短縮された.

図 10 に, 擬実データに対し, 提案軌道推定法を適用した例を示す. このとき  $x_{det}$  は, 前節で提案信号検出法を用いて得られた軌道パラメータを用いた. 破線は検出時のコヒーレント積分後の信号で, 実線が推定パラメータを用いたコヒーレント積分後の信号である. 検出時と比べピーク電力が上昇し, 距離が遠方へ移動していることがわかる. また, 図 11 に軌道推定時の  $v_d$  変化を示す. 提案軌道推定法により, 検出時と比較して評価値が約 0.17 dB 上昇し, SNR が改善された. また, 推定軌道パラメータは表 2 より, 予報値と比較して  $r_1$  は 89 m,  $v_d$  は 21 m/sec の精度で推定することができた.

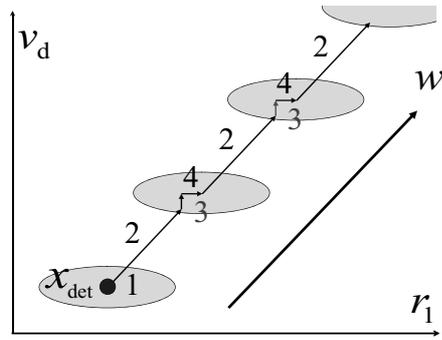


図 9 提案軌道推定法模式図

Fig. 9 Model of the Proposed Orbit Estimation Method.

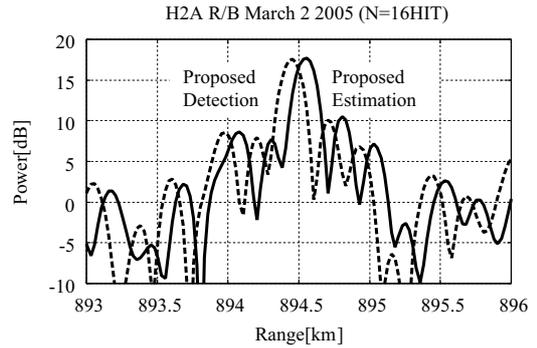


図 10 提案軌道推定法適用結果

Fig. 10 Result of Proposed Orbit Estimation Method Applied to the Pseudo Real Data.

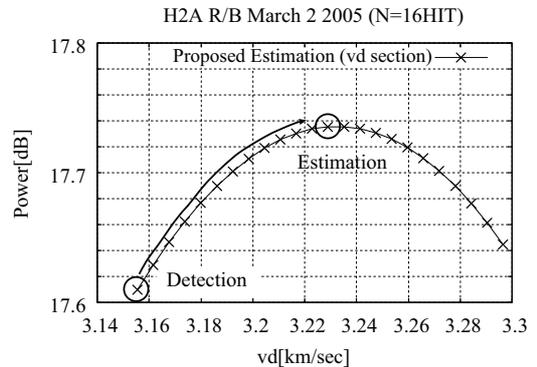


図 11 提案軌道推定法 ( $v_d$  断面図)

Fig. 11 Orbit Estimation ( $v_d$  section).

## 6. 提案軌道推定法の精度評価

提案法の軌道推定精度を検証する. 提案法の特徴は, 運動モデルを仮定してコヒーレント積分を行うことである. その特徴を比較するため従来法を第 2 節で述べた, 単一パルスで距離, ドップラ速度を推定する手法を改良し, 複数パルスを用いてインコヒーレント積分を行う手法とする. 但し, デブリの速度を 8 km/sec,  $T_{IPP}=7,500 \mu\text{sec}$ ,  $N=16$  とすると, デブリは, 積分時間  $NT_{IPP}$  間に 960 m 進む. パルス圧縮後の距離分解能  $\Delta r = 225 \text{ m}$  であるので, インコヒーレント積分においても距離方向の補正がなければ, 積分効果を十分得ることができ

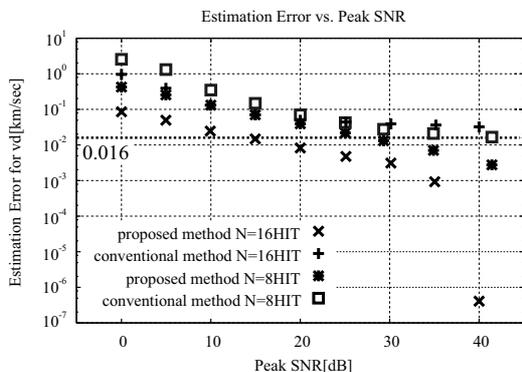


図 12 従来法と提案軌道推定法の軌道推定精度比較

Fig.12 Accuracy Comparison of the Proposed and the Conventional Methods.

ない．そのため，従来法は視線方向での等速直線運動を仮定し，インコヒーレント積分を行い，ピーク電力が最大となるドップラ速度を探索する手法とする．式 (9) に従来法の評価式を示す．

$$\max_{v_d, t} \sum_{i=1}^N \left| \int r_i(\tau) h_i(t - 2iT_{IPP}v_d/c - \tau) d\tau \right|^2 \quad (9)$$

従来法は，信号の位相情報を必要としないので単純かつ提案法と比べ計算時間が少ないが，視線方向の等速直線運動を仮定しているため，SNR が無限大であっても推定軌道パラメータには誤差が生じる．

図 12 は縦軸に  $v_d$  の軌道推定誤差，横軸にピーク SNR をとった図である．真値は  $x=(800 \text{ km}, 4.0 \text{ km/sec}, 60^\circ)$  であり， $N = 8, 16$  である．推定誤差は，2 乗平均平方根誤差 (RMSE) で評価した．この条件下では，従来法を用いた  $v_d$  の軌道推定精度限界は，約 0.016 km/sec である．この図から，従来法と比べ，全ての SNR において提案法の推定精度が優位であり，特に低 SNR ではその優位性が顕著であることがわかる．また， $N = 16$  で SNR 40 dB の場合，提案法の推定精度が極端に良くなっている．他の SNR の場合推定精度は，真値に近い準最適解を推定できるかどうかが支配的であるのに対し，この場合は，真値ではない準最適解を推定点とすることが無いためである．

## 7. まとめと今後の予定

本稿では，単一パルスでは検出困難なデブリからのエコーに対し，デブリの運動モデルを等速直線運動と仮定し，コヒーレント積分を用いる高速信号検出アルゴリズムを提案した．提案信号検出法では， $N = 16$ ， $T_{IPP} = 7,500 \mu\text{sec}$  の条件で， $v_d$  軸方向の探索を単純に  $v_d$  を更新する手法に比べて，約 72 倍高速化することが可能であることを示した．また，KSGC レーダで観測された H2A-R/B からのエコーに擬似的に雑音を加え，検出限界と同等な SNR にした擬似実データに対し，提案信号検出法を適用することで，SNR が約 10.45 dB 改善することが確認された．

提案信号検出法で検出した軌道パラメータ  $x_{\text{det}}$  から，評価関数の大域最適解を探索し，デブリの軌道を効率的かつ高精度に推定する手法を提案した．提案軌道推定法では，繰り返しフィ

ルタリング処理を行い，局所最適化を行う手法に比べて，約 25 倍高速化することが可能であることを示した．SNR は，検出時から約 0.17 倍改善し，軌道パラメータも予報値に比べて，距離で 89 m，ドップラ速度で 21 m/sec の精度で推定できた．また，推定精度は従来法に比べて優位であり，特に低 SNR ではその優位性が顕著であることを示した．

本稿では軌道パラメータ  $x$  の内， $\phi$  を真値と仮定してアルゴリズムを開発した．今後は  $\phi$  も含めた，全軌道パラメータ推定法の開発を行う必要がある．

謝辞 本研究で用いた KSGC レーダのデータは財団法人日本宇宙フォーラムにより提供された．

## 文 献

- [1] 八坂哲雄，宇宙のゴミ問題-スペースデブリ-，裳華房，東京，1997.
- [2] N.L.Johnson and D.S McKnight, Artificial Space Debris, Orbit Book Co., 1987.
- [3] P.A. Jackson, "Space Surveillance Satellite Catalog Maintenance," Orbital Debris Conference, No AIAA-90-1339, 1990.
- [4] 磯田健太郎，阪本卓也，佐藤 亨，"評価関数の周期性を用いたスペースデブリレーダの効率的検出感度向上法," 電子情報通信学会ソサイエティ大会, B-2-12, 2005.
- [5] 磯田健太郎，阪本卓也，佐藤 亨，"評価関数の準周期性を利用したスペースデブリレーダのための高速軌道推定法," 電子情報通信学会総合大会, B-2-9, 2006.
- [6] K Isoda, T Sakamoto, T Sato, "An Effective Orbit Estimation Algorithm for a Space Debris Radar using the Quasi-Periodicity of the Evaluation Function," European Conference on Antennas & Propagation (EuCAP) 2006, 2006.
- [7] Merrill I. Skolnik, Introduction to Radar Systems, McGraw-hill, pp493-497 ,1962.