

惑星地下探査用レーダサウンダシステムの開発

Development of a new radar sounder system for planetary subsurface exploration

熊本 篤志 [1]; 小野 高幸 [2]; 笠羽 康正 [1]; 飯島 雅英 [3]; 小林 敬生 [4]

Atsushi Kumamoto[1]; Takayuki Ono[2]; Yasumasa Kasaba[1]; Masahide Iizima[3]; Takao Kobayashi[4]

[1] 東北大・理; [2] 東北大・理; [3] 東北大・理・地物; [4] KIGAM

[1] Tohoku Univ.; [2] Department of Astronomy and Geophysics, Tohoku Univ.; [3] Geophysical Inst., Tohoku Univ.; [4] KIGAM

はじめに: 月・小惑星・固体惑星などの表層構造について地質学的理解を進め、その成因・進化の過程を議論していく上で、表面地形に加えて地下構造に関する実証的な科学観測データを得る意義は大きい。レーダサウンダーによる地下探査は、アポロ17号ミッションにおいて初めて月地下探査に適用された [Peeples et al., 1978]。その後、火星において MEX ミッションが氷層の観測、地下クレータの観測で成果を上げ [Picardi et al., 2005; Watters et al., 2006]、MRO ミッションの観測も開始されている。かぐやミッションでは月レーダサウンダー (LRS) による月面全域をカバーした地下探査を行うことが予定されており [Ono and Oya, 2000; Ono et al., 2008; Kumamoto et al., 2008]、2007年12月の定常運用開始以降、順調に観測を継続している。本研究では、かぐやLRSと同型のレーダサウンダーシステムをそのまま惑星地下探査に適用した場合に予想される課題を検討し、その対策となる機器開発を開始している。

惑星地下探査サウンダーシステムの課題: かぐやLRSと同様のサウンダーシステムをそのまま将来の惑星探査ミッションに適用しようとした場合、いくつかの問題点が浮上してくる。かぐやのように大型の科学衛星ミッションと異なり、惑星探査ミッションにおいては電力リソースの制限が厳しくなる一方で、表層媒質による損失、電離圏における減衰遅延等の月にはない観測条件も加わり、観測 S/N の更なる向上が必要となる。また MEX やかぐやの観測の初期データからもわかるように、直下点エコーから遅れて届く地下エコーと非直下表面エコーの識別は必ずしも容易ではなく、合成開口 (SAR) 処理等の進んだ解析を想定にいれて送信機的设计を行うことが望ましい。

以上に述べた諸課題を解決し、次世代型惑星地下探査用レーダサウンダーを実現するため、以下の開発を行うことを計画している。

(a) D 級・E 級増幅方式を採用した高効率パワーアンプの開発: かぐやLRSのパワーアンプではB級増幅方式が採用されているが、その電力変換効率は25%にとどまる。送信電力の低減をさせて消費電力の削減を行おうとした場合、電力変換効率の改善は避けて通れない。半導体素子のスイッチング動作を利用したD級・E級増幅方式は原理的には90%以上の電力変換効率が可能となる。

(b) SAR 解析の適用に十分なパワーアンプの高PRF化: かぐやは観測波長 $\lambda = 60\text{m}$ に対し、パルス繰り返し周波数 (PRF) を 20Hz としたため、衛星の進行方向の空間分解能は $\lambda/2$ を上回り、SAR 解析の適用がやや難しい。送信電力を大きくした場合、地下エコーの強度が大きくなる一方で、それらに重畳する表面エコーの強度も同じだけ大きくなる。送信電力を大きくするよりも高PRF化を行う方がSAR処理を適用しやすく、地下探査の検出には有利となる可能性が高い。

(c) 高ゲイン送受信のための軽量宇宙展開八木アンテナの開発: かぐやLRSでは送受信アンテナにダイポールアンテナを採用しているため、送信電力はほぼ等方的に放射されていた。八木アンテナのように指向性をもったアンテナを採用できれば送信電力を地表方向に集中できS/N上は有利となるが、展開機構をどう実現するかが課題となっていた。近年、インフレーション技術を応用した軽量リジッドアンテナが開発され、観測ロケットへの搭載実験も開始された。この手法をさらに推し進め、浮き輪状のインフレーション構造物の上にエレメントを配置した八木アンテナの基礎開発を進めている。

(d) 電離圏による分散の自動補正機能を備えた受信信号処理部の開発: 火星・金星・木星のいくつかの衛星には電離圏が存在し、レーダ観測のS/Nを著しく低下させることが予想される。FMCWレーダの場合、電離圏プラズマの分散性によって周波数に依存して遅延時間が変化するために、パルス圧縮によるS/N向上の効果が低減することが指摘され、その対策として機上の参照信号に伝搬路上の総電子数 (TEC) に応じて変調をかけることが提案されている [小林・小野, 2002]。電離圏をもつ天体の地下探査を想定する場合、こうした手法を適用した受信信号処理系の開発も必要となってくる。

まとめ: かぐやLRSは成功裏に月周回軌道からのサウンダー観測を開始し、月面全域での地下探査を目指して、順調に観測を継続している。ただし、将来の固体惑星・衛星・小天体探査ミッションにおいてサウンダーによる地下探査を行うことを想定した場合には、かぐやの実績を土台としつつ、惑星地下探査に固有の諸課題にも対応可能な次世代型のサウンダーシステムを確立していく必要がある。