

4-7 GPS パッシブレーダーによる散乱波の検出

4-7 Detection of Scattered Signal using GPS Passive Radar

新垣吉也 雨谷 純

Yoshiya ARAKAKI and Jun AMAGAI

GPS 信号の散乱波を用いるパッシブレーダーについて報告する。散乱波は極めて信号強度が弱いため、ビームアンテナを用い長時間積分を行うことによって、特徴的なドップラー周波数変位を伴う散乱波の検出を行った。

We report on passive radar using scattered signal of GPS. Since the scattered signal is extremely weak in signal intensity, we adopted a beam antenna and long integration time and we could get the scattered signal with characteristic Doppler frequency shift.

1 まえがき

送信装置を必要としないパッシブレーダーは、装置が簡単になること、無線局免許が不要であることから無人運用、多地点観測に適している。放送波は電力が大きいことからパッシブレーダーとして多くの研究が行われてきた。しかしながら測位衛星 (GNSS) の信号は、地上での電力密度が 0.1 pW/m^2 程度と微弱であることから、これまでは鏡面反射点からの反射のみを対象とした GNSS-R と呼ばれる手法が用いられてきた [1] [2]。任意の方向に散乱した GNSS の信号を検出するためには、ゲインアンテナと長時間の積分を必要とする。今回、有効径 75 cm のパラボラの焦点に GNSS 用のアンテナを装着して、GPS L5 信号の散乱波を受信し、 40 秒間にわたりコヒーレントに積分することにより、特徴的なドップラー周波数変位をもつ散乱波を検出したので報告する。

2 直達波に対する散乱波の遅延時間と散乱点-受信点間距離

受信点から衛星へのベクトルを \vec{S} 、受信点から散乱点へのベクトルを \vec{B} 、受信点から見た衛星の仰角を El 、受信点から見た衛星と散乱点の方位角差を ΔAz とする。以下の議論では、散乱点は受信点を含む水平線面内にあるものとする。すなわち、散乱点と受信点は同一高度の地表面にあり、かつ $|\vec{B}|$ が地球半径に比べて十分に小さいとする。

\vec{S} と \vec{B} のはさむ角 θ は、

$$\cos \theta = \cos El \cos \Delta Az \quad (1)$$

と表されるので、バイスタティックレーダーの距離換算の式 [3] から、直達波に対する散乱波の遅延時間 τ から求まる見かけの距離 $r (r = c \tau, c$ は光速) を使って、散乱点-受信点間距離 $|\vec{B}|$ は、

$$|\vec{B}| = \frac{\frac{1}{2}r^2 + r|\vec{S}|}{(|\vec{S}| + r) - |\vec{S}| \cos El \cos \Delta Az} \quad (2)$$

と表せる [4]。 $|\vec{S}| \gg r$ なので、

$$|\vec{B}| \approx \frac{r}{1 - \cos El \cos \Delta Az} \quad (3)$$

となる [4]。

3 衛星の移動に伴うドップラー周波数変位

散乱点から衛星へのベクトルを \vec{S} 、光速を c とすると、直達波に対する散乱波の遅延時間の変化率 $\dot{\tau}$ は、

$$\begin{aligned} \dot{\tau} &= \frac{1}{c} \frac{d}{dt} \{ (|\vec{S}| + |\vec{B}|) - |\vec{S}| \} \\ &= \frac{1}{c} \frac{d}{dt} |\vec{S}| - \frac{1}{c} \frac{d}{dt} |\vec{S}| \end{aligned} \quad (4)$$

で表せる [4]。ここで地上に固定された座標系での衛星の速度を \vec{v} とすると、

$$\dot{\tau} = \frac{1}{c} \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|} \cdot \vec{v} - \frac{1}{c} \frac{\vec{S}}{|\vec{S}|} \cdot \vec{v} \quad (5)$$

となる。ドップラー周波数変位 Δf はこの遅延変化率

4 衛星センサによる宇宙からの地球環境観測

と波長 λ から

$$\Delta f = \frac{1}{\lambda} \left\{ \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} - \frac{\vec{s}'}{|\vec{s}'|} \right\} \cdot \vec{v} \quad (6)$$

と表される [4]。

ここで、 $\frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} - \frac{\vec{s}'}{|\vec{s}'|}$ は、 $|\vec{s}| \gg |\vec{B}|$ を考慮すると、 \vec{B} を \vec{s} に直交する平面に投影したベクトルを \vec{B}' 、 $\frac{\vec{B}'}{|\vec{B}'|}$ を $\vec{u}_{B'}$ として、

$$\begin{aligned} \frac{\vec{s}}{|\vec{s}|} - \frac{\vec{s}'}{|\vec{s}'|} &\doteq \frac{1}{|\vec{s}|} (|\vec{B}'| \sin \theta) \vec{u}_{B'} \\ &= \frac{\vec{B}'}{|\vec{s}|} \end{aligned} \quad (7)$$

となるから、式 (6) は、

$$\Delta f \doteq \frac{\vec{B}' \cdot \vec{v}}{\lambda |\vec{s}|} \quad (8)$$

のように表される。

式 (3) 及び (8) を使って計算した見かけの距離とドップラー周波数変位の例を図 1 に示す。衛星の動きに伴って、また、同一時刻においても方位角によって、見かけの距離、ドップラー周波数変位とともに大きく変化することがわかる。

図 2 に、方位角 125 度、ビーム半値幅 20 度のアンテナで観測した場合のレンジ・ドップラーマップの例を示す。アンテナビーム内にある物体からの散乱波は、観測する距離の上限を 4 km とした場合、図の着色した範囲で観測される。レンジ・ドップラーマップ上に

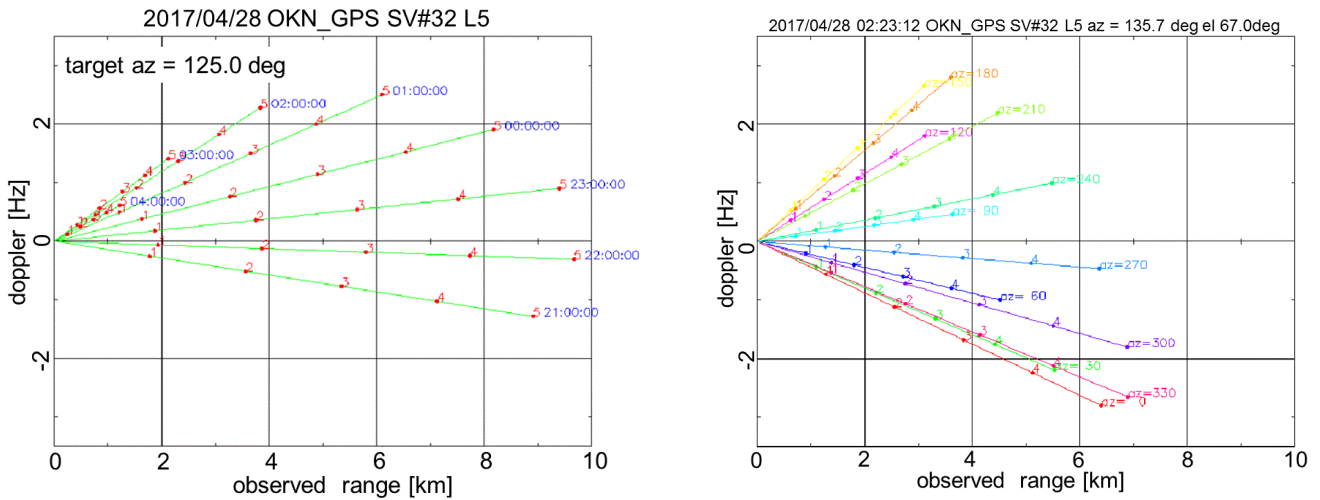


図 1 見かけの距離とドップラー周波数変位の時間変化 (左) と方位角依存性 (右)

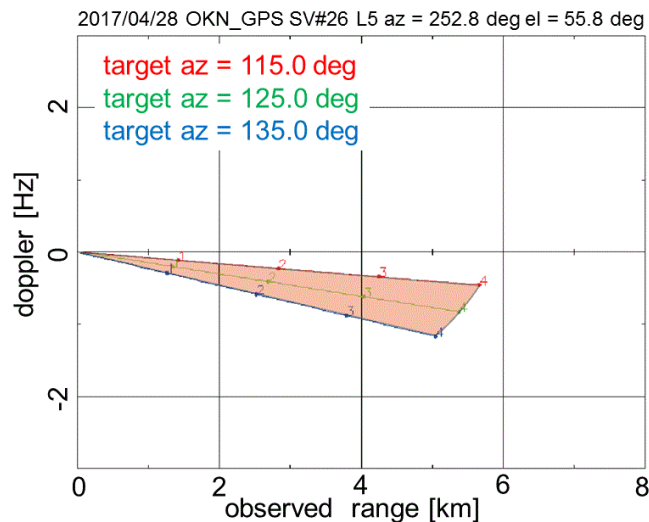


図 2 アンテナビーム内で観測される散乱波のレンジ・ドップラーマップ上の範囲
方位角 125 度 +/- 10 度の範囲にある物体からの散乱波の見かけの距離及びドップラー周波数変位 (着色部分)。
横軸は見かけの距離、図中の線上の数字は実際の距離 [km] を表す。

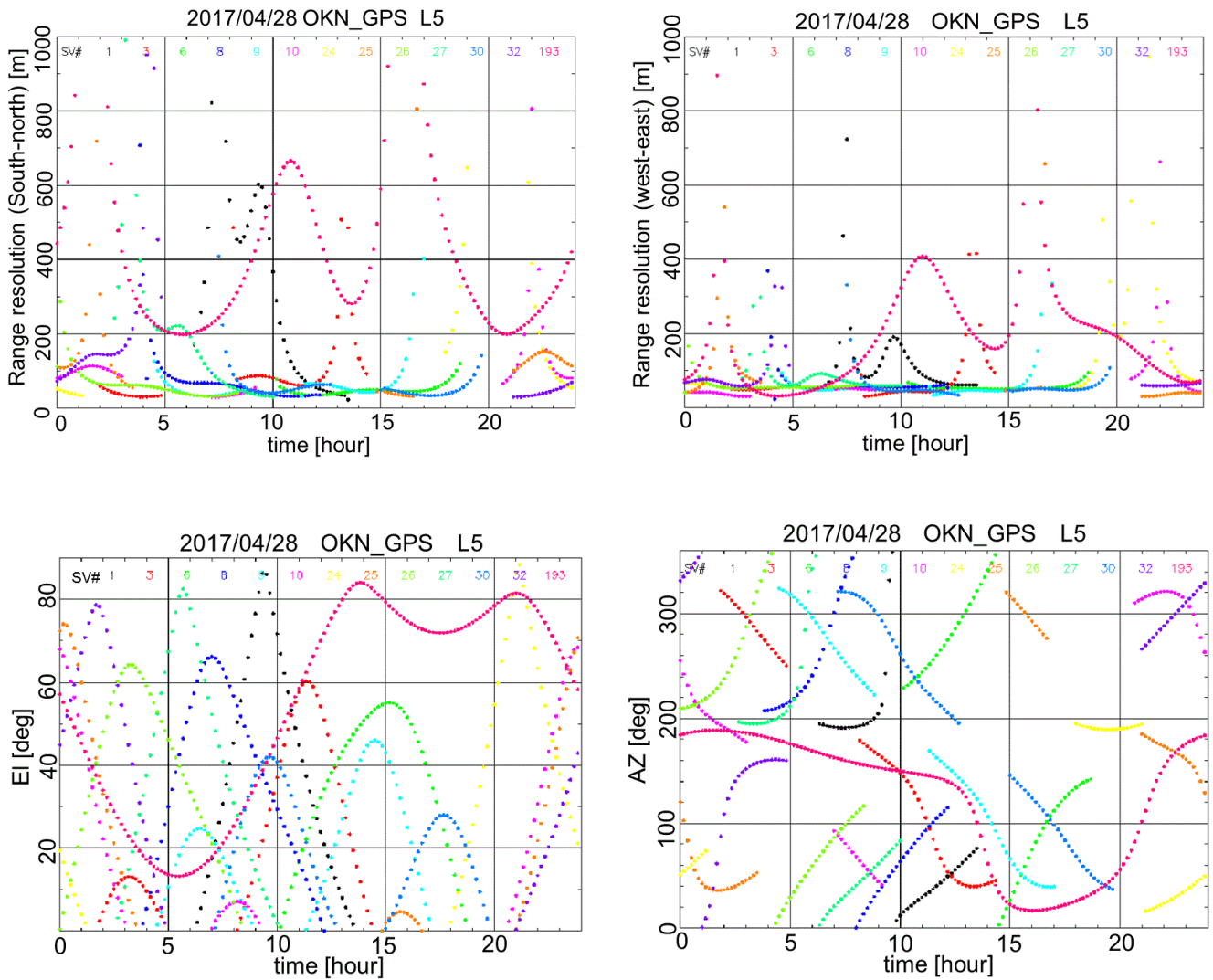


図3 分解能の時間変化

上左：南北方向の距離分解能の時間変化、上右：東西方向の距離分解能の時間変化
 下左：各衛星の仰角の時間変化、下右：各衛星の方位角の時間変化

において、観測されるデータは着色した部分の面積が大きければ大きいほど、多くのセルに分割され、ビーム内を細かく分解して観測することができる。一方、散乱波のエネルギーは、散乱源の状態が均質である場合においては散乱源の面積に比例するから、図の着色した部分の面積が狭いほうが1セルに対応する散乱源の面積は増加し、観測値のSN比は改善されると考えられる。

有効帯域幅を10 MHz、積分時間を40秒としたときの方角125度、距離3 kmにおける東西・南北方向の距離分解能の計算値を、仰角・方位角の時間変化とともに図3に示す。

準天頂衛星は沖縄で24時間観測できるが衛星高度がGPSに比べ高いため式(8)の \vec{v} の絶対値が小さく、 $|\vec{S}|$ が大きいことから、ドップラー周波数変位が小さく分解能は高くない。

時間とともにレンジ-ドップラーマップ上の位置が

変化するため、積分時間を極端に長くすることはできないが、数十秒程度であれば分解能に比べ十分に小さい範囲の変化にとどまることが図1の左図から読み取れる。

4 散乱波の受信可能条件

受信信号とレプリカ信号との相互相関積分で得られる相関振幅 ρ は、受信信号の電力を P_A 、受信信号以外の雑音電力を P_N とすると、

$$\rho = \sqrt{\frac{P_A}{P_A + P_N}} \quad (9)$$

で表され、これを用いると受信信号のSN比 $R_{S/N}$ は、受信帯域幅を B 、積分時間を T とし、さらに $P_A \ll P_N$ であることを考慮すると

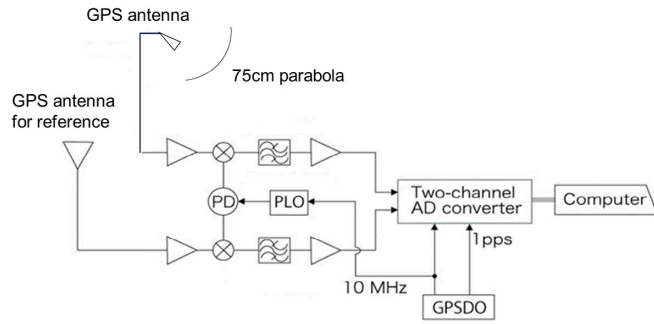


図4 受信システム

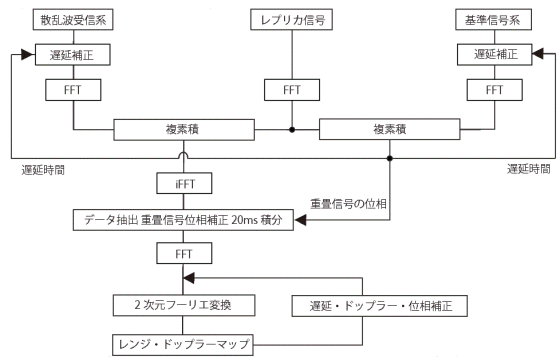


図6 PC 内での信号処理

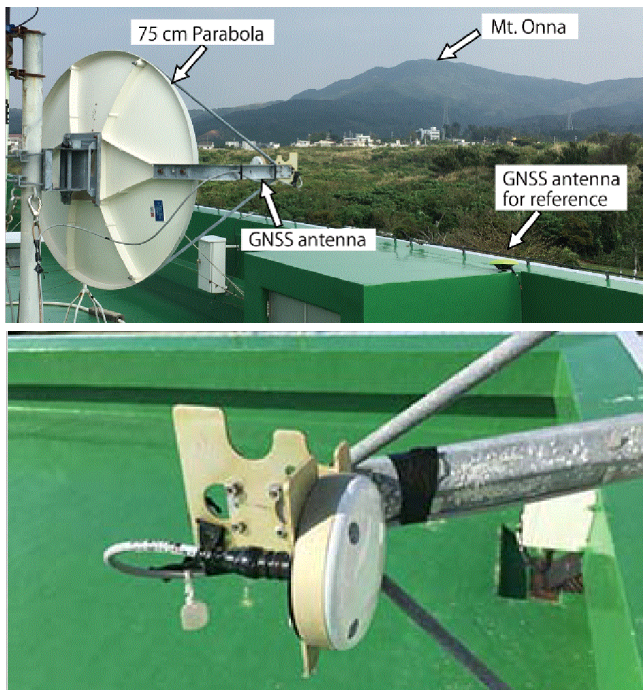


図5 (上) アンテナと観測対象の恩納岳、(下) パラボラアンテナの焦点に取り付けられた GNSS アンテナ

$$R_{S/N} = \sqrt{\frac{P_A}{P_N} 2BT} \quad (10)$$

となる。受信機の NF を 3 dB (受信信号以外の雑音は受信機のシステム雑音が支配的であるとする)、受信帯域幅を 20 MHz、積分時間を 40 秒とすると、所望受信電力 P_A は、

$$P_A > 5.2 \times 10^{-23} \times R^2 S_{/N} [W] \quad (11)$$

と見積られる。GPS 信号の地表面での電力密度 S を $0.1 pW/m^2$ 、散乱源の面積を A 、単位面積あたりの散乱断面積を σ 、散乱源と受信点の間の距離 R を 3 km、受信アンテナの開口径 D を 75 cm とすると、

$$P_A = SA\sigma \left(\frac{D}{2}\right)^2 \frac{1}{4\pi R^2} > 5.2 \times 10^{23} \times R^2 S_{/N} [W] \quad (12)$$

$$A\sigma > 0.13 \times R^2 S_{/N} [m^2] \quad (13)$$

となるから、距離分解能を 15 m、方位分解能を 0.5 度 (3 km の地点で 26 m の距離分解能) とすると、

$$\sigma > 3.3 \times 10^{-4} \times R^2 S_{/N} \quad (14)$$

と見積られる。

5 観測システム

観測に用いたシステムのブロック図を図4に、使用したアンテナ及び観測対象とした恩納岳の写真を図5左に示す [4]。散乱波受信系に使用するアンテナには、市販の有効径 57 cm の BS アンテナの給電部を取り外し、代わりに通常の GNSS 用アンテナを装着したものをを用いた (図5下)。このアンテナのゲインは約 17 dB、ビーム半値幅は約 20 度と見積られる。局内遅延の補正と、GPS の重畳信号による位相反転を検出するため、通常の GNSS アンテナを基準受信系として用いた。現在、種々の GNSS 信号が利用できるが、帯域幅の広さと送信している衛星数の多さから、GPS の L5 信号 [5] (中心周波数 1176.45 MHz、チップレート 10.23 MHz) を採用した。2 つのアンテナの信号は、中心周波数 80 MHz に周波数変換した後、帯域幅 32 MHz のバンドパスフィルタで帯域制限し、64 Msps、量子化ビット数 8 ビットでアンダーサンプリングした。サンプリングには VLBI 用に開発された AD コンバータを使用した。サンプリングしたデータは PC に転送し解析を行った。PC 内での解析 (図6) では、yuma アマルナック [6] を用い、周波数の 1 次変化分まで、遅延の 2 次変化分までの予測値を計算し、それらを補正しつつレプリカ相関を行った。まず、基準受信系のレプリカ相関により局内遅延を推定した後、その値を用いて散乱波受信系のレプリカ相関を行った。相互相関はいわゆる FX 法を用いて、GPS L5 信号のコード長である 1 ミリ秒ごとに行った。

L5 信号にはデータが重畳されているため、位相が不定期に反転する。そのため、基準信号系の位相反転

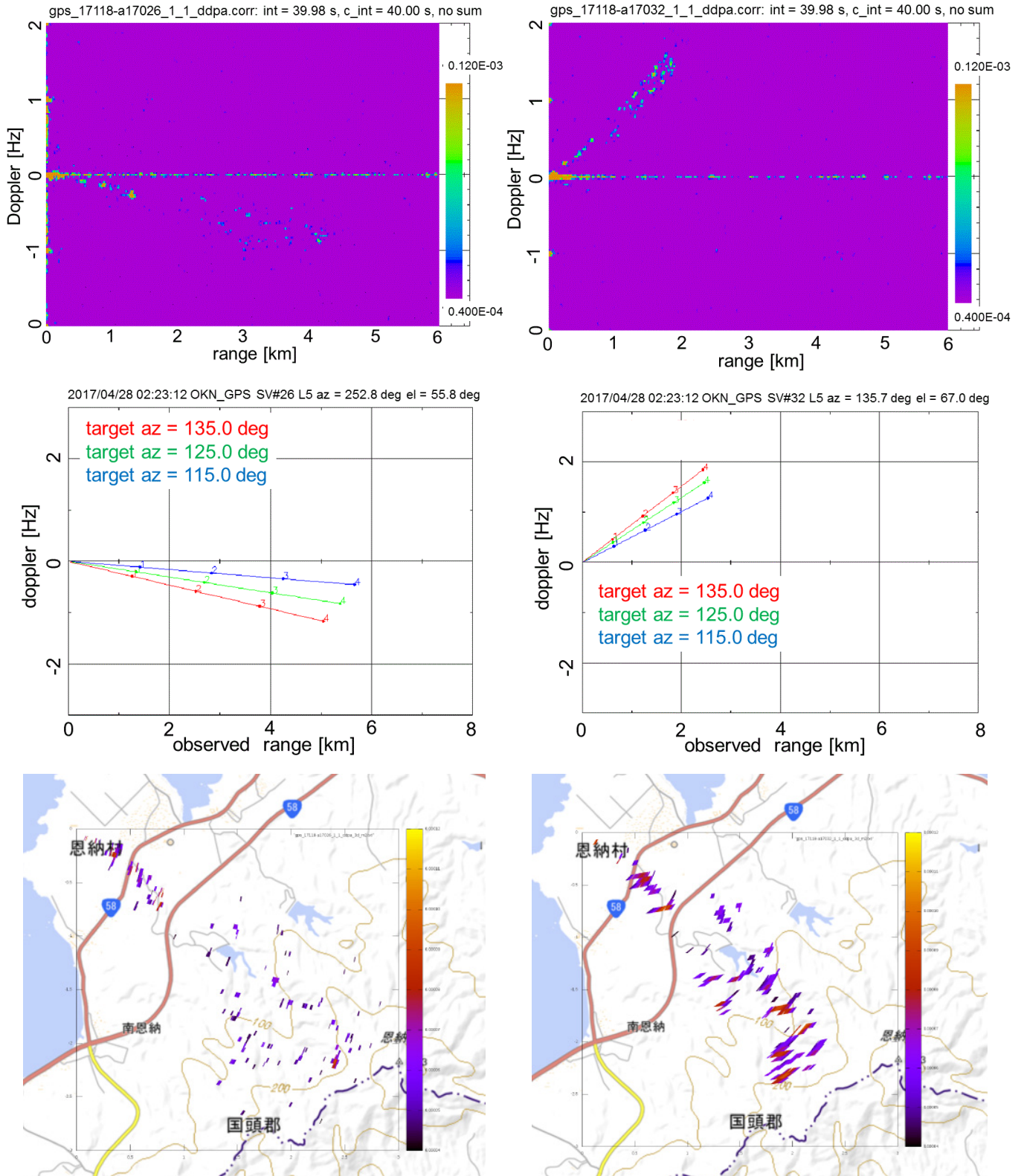


図7 散乱波の観測値(上)、計算値(中)及び地図上への投影(下)

左側は SV # 26、右側は SV # 32 に関する図。観測値、計算値とも横軸は観測された見かけの距離。図中の赤、緑、青の線はそれぞれ、アンテナのビーム中心から -10 度、0 度、+10 度の方位角について 計算した結果であり、数字は受信点からの実際の距離 [km] を表している。地図の左上端が観測点、右下に恩納岳。地理院地図 (<https://maps.gsi.go.jp/>) を用いて作成

を基に、散乱波受信系の位相を反転させつつ 20 ミリ秒ずつ積算した。

こうして得られた 20 ミリ秒ごとのクロススペクトルについて 1 秒分ずつ 2 次元フーリエ変換を行い、レ

ンジ・ドップラーマップを生成した。このレンジ・ドップラーマップ上に現れる直達波の情報を基に、予測値の不正確さから生じる遅延、ドップラー周波数、位相の残差分を、20 ミリ秒ごとのクロススペクトルに対

して補正した後、再度、今度は40秒分のデータについて2次元フーリエ変換を行い、レンジ・ドップラーマップを作成した。

6 観測結果

沖縄電磁波技術センターの庁舎屋上に設置した散乱波受信アンテナ(北緯26度29分55秒、東経127度50分41秒、標高19m)を南東方向に3.7kmほど離れた山(恩納岳 北緯26度28分44秒、東経127度52分29秒、標高363m)に向け、データを取得した。取得したデータを解析して得られたレンジ・ドップラーマップの例を、計算値及び地図上への投影図とともに図7に示す[4]。3に示したように、レンジ・ドップラーマップ上の散乱波が予想される部分の面積が大きいほど、分解能が高く、SN比が低下することが予想されるが、観測値及び地図上の投影結果にそれを見ることができる。

地図上で、衛星により散乱源の場所が異なるように見えるが、観測時、SV # 26は南西方向($Az=252.8^\circ$, $EI=55.8^\circ$)にあり後方散乱に近く、SV#32は南東方向($Az=135.7^\circ$, $EI=67.0^\circ$)にあり前方散乱に近いことから、散乱源へのGPS信号の照射方向の違いによるものと考えられる。本方式のGNSS-Rに対する利点は、GPSの電波が散乱源に対し照射されることであり、これを利用すれば散乱源の散乱断面積の異方性を計測できる可能性がある。

7 まとめ

有効径75cmのパラボラアンテナを用い、40秒間コヒーレントに積分することにより、GPS L5信号の山の斜面からの散乱波を検出した。観測時間中に衛星が移動することから、合成開口レーダーのように、方位角分解能が実開口のそれと比べ改善されることが確認された。また、衛星により散乱源に対し電波が照射される角度が変化するため、散乱源の分布が異なることも確認された。今後、データを蓄積し、散乱源の状態やその変化の抽出を行っていきたい。

謝辞

開発したサンプラー制御ソフトを使わせていただいた、NICTのVLBI開発グループの方々、時空標準研究室 後藤忠広主任研究員に感謝いたします。

【参考文献】

- 1 M. Martin-Neira, "A Passive reflectometry and interferometry system (PARIS): Application to ocean altimetry," ESA J., 17:331-355, 1993.
- 2 T. Hobiger, J. Amagai, M. Aida, and H. Narita, "A real-time GNSS-R system based on software-defined radio and graphics processing units," Adv. Space Res., vol.49, no.7, pp.1180-1190, 2012.
- 3 M. I. Skolnic, "Introduction to Radar system," McGraw-hill, 1962.
- 4 Y. Arakaki, J. Amagai, "Detection of GPS signal scattered from mountain," IEICE Communications Express, Vol.7, No.4, pp115-119, 1 April, 2018.
- 5 IS-GPS-705, Navstar GPS space segment/User Segment L5 Interfaces, 24 Sept. 2013.
- 6 <https://www.navcen.uscg.gov/?pageName=gpsAlmanacs>



新垣吉也 (あらかき よしや)

電磁波研究所
時空標準研究室
主任研究員
リモートセンシング



雨谷 純 (あまがい じゅん)

イノベーション推進部門
受託研究推進室
リモートセンシング、時刻周波数比較、電波干渉計