

機械学習を用いた気象レーダーの グランドクラッター自動識別技術

Automatic Ground Clutter Identification Techniques for Weather Radars Using Machine Learning

青木 朝海 AOKI Tomomi 山口 恵一 YAMAGUCHI Keiichi 木本 圭優 KIMOTO Yoshimasa

電波で雨雲の分布や降雨強度を測る気象レーダーでは、低仰角での観測において山やビルなどからの不要な反射信号（グランドクラッター）を精度良く識別・除去することが、観測データの質の向上に不可欠である。従来、特徴量としきい値を比較する条件分岐型のアルゴリズムによってグランドクラッターを識別・除去してきたが、専門知識を持つ技術者がレーダーサイトごとにしきい値を調整する必要があり、熟練者への高い依存、及び調整に要する負荷を、軽減することが課題であった。

東芝は、機械学習を用いてグランドクラッターを自動で識別し、気象観測データから学習用データも自動で生成できる技術を開発している。マルチパラメーター フェーズドアレイ気象レーダー（MP-PAWR）の実データを用いた性能評価で、観測データから自動生成した識別モデルでも従来手法と比べて同等以上の識別性能を実現できることを確認した。

Weather radars for the observation of meteorological phenomena including raincloud distribution and rainfall intensity have become indispensable for accurate weather forecasting in recent years. In order to improve the quality of weather radar data obtained at low elevation angles, it is essential to identify and remove ground clutter signals reflected by various objects such as mountains, tall buildings, and so on. Conditional branching algorithms are conventionally used to identify whether received signals are contaminated with ground clutter signals by comparing feature quantities with threshold values. However, engineers skilled in this field are necessary to adjust ground clutter identification parameters at each radar site for the optimal operation of these algorithms. As a result, the need has arisen for reduction of the dependence on skilled engineers and lessening of the heavy burden of such work.

Toshiba Corporation has responded to this situation by developing an automatic ground clutter identification algorithm for weather radars using machine learning, as well as a technique to automatically generate training data for such machine learning from observation data. We have conducted evaluation experiments using the actual data of a multiparameter phased array weather radar (MP-PAWR), and confirmed that these techniques obtain identification accuracies equivalent to or exceeding those of conventional identification techniques.

1. まえがき

近年のゲリラ豪雨や大規模水害の甚大化を背景として、気象レーダーによる雨雲などの早期検知への期待が高い。東芝インフラシステムズ（株）は、ゲリラ豪雨を引き起こす積乱雲の3次元構造を高密度に観測できるX帯MP-PAWRを、世界に先駆けて開発した⁽¹⁾。MP-PAWRは、送信ビームに垂直方向に広がりを持った扇状のビーム（ファンビーム）を用いて一度に観測できる領域を大きくすることで、従来のパラボラ型気象レーダーに比べて10倍のスピードでの高速観測を実現した。

気象レーダーの観測領域に、山や、高いビルなどが存在すると、送信した電波がそれらに反射し、グランドクラッターとして受信される（図1）。MP-PAWRは、ファンビーム送信の影響で広範囲からグランドクラッターを受けるおそれがあるため、精度良くグランドクラッターを識別・除去する技術が不可欠である。

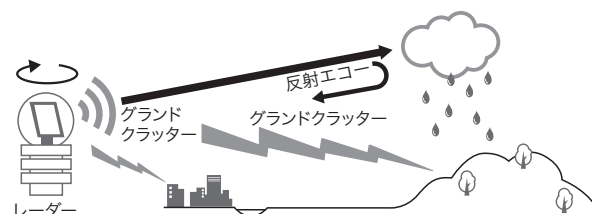


図1. グランドクラッター発生メカニズム

観測対象でない山やビルに送信信号が反射し、不要成分となる。

Mechanism of ground clutter generation

一般に、気象レーダーには、グランドクラッター識別・除去システムが搭載されている⁽²⁾。観測データを、グランドクラッターの特徴を表現する物理量に変換し、それらをしきい値と比較することで、グランドクラッターを識別する。これまでは、専門技術者が経験に基づいて識別アルゴリズムのしきい値調整を行ってきたが、調整負荷の高さや熟練技術者の減少が問題視されていた。

そこで東芝は、機械学習を用いたグラウンドクラッター自動識別技術、並びに気象観測データから学習用データを自動で生成する技術を開発した。更に、実際の気象観測データを用いた評価を行い、従来手法と比較して開発手法の高い識別性能を確認し、専門知識の有無に関わらずグラウンドクラッターの識別・除去が可能であることを実証した。

ここでは、機械学習型のグラウンドクラッター自動識別技術の概要と、MP-PAWRの実観測データを用いた性能評価について述べる。

2. 従来のグラウンドクラッター識別・除去システム

クラッターは、観測領域に存在する観測対象以外からの反射であり、山やビルなどの構造物によるグラウンドクラッターや、昆虫や鳥の群れで発生する生体クラッター、海の波しぶきで発生するシークラッターなど、種類は様々である。1,000 m以上の山地が国土の約6.4%を占める日本において、グラウンドクラッターの発生は不可避であり、一般的な気象レーダーにはグラウンドクラッター識別・除去システムが搭載されている。気象レーダーの観測対象である雨雲が動的物標なのに対し、グラウンドクラッターは静止物標である。グラウンドクラッターの識別・除去には、これらの速度差を示す特徴量を利用している。

2.1 グラウンドクラッター識別に用いる特徴量

図2に、グラウンドクラッター識別に用いる代表的な三つの特徴量を示す。

CSR (Clutter to Signal Power Ratio) は、観測データの信号電力に対するグラウンドクラッター除去処理後の信号電力の比である。CPA (Clutter Phase Alignment) は、受信信号の時間的な変動を表し以下で定義される。

$$CPA = \frac{|\sum_{i=1}^N IQ_i|}{\sum_{i=1}^N |IQ_i|} \quad (1)$$

N は平均サンプル数、 IQ_i は i 番目の時間の受信信号である。グラウンドクラッターは静止物標からの反射なので、観測時間内のCPAは大きくなるが、動的物標である降水エコーにおいては平均処理によりその値が小さくなる。 ϕ_{dp} 変動は、偏波間位相差 ϕ_{dp} の距離変動である。降水エコーでは距離方向に ϕ_{dp} が滑らかに変動するが、グラウンドクラッターは変動が激しいという特徴がある。

2.2 従来のグラウンドクラッター識別・除去フロー

図3に、グラウンドクラッター識別・除去フローを示す。

観測データにグラウンドクラッター除去処理を適用した信号

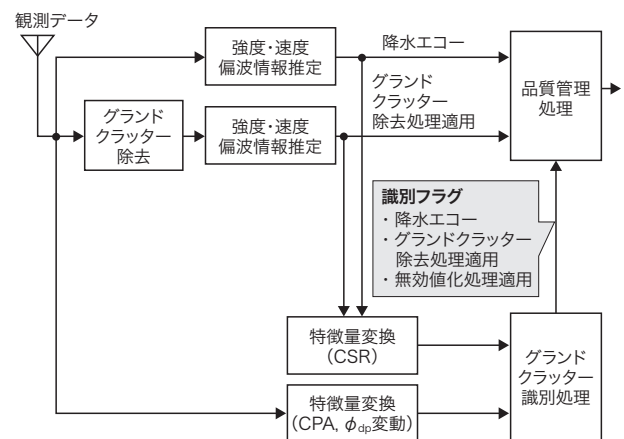


図3. グラウンドクラッター識別・除去処理フロー

特徴量に基づき、データを3種類に識別し、結果に応じてグラウンドクラッターを除去する。

Flow of processes for ground clutter identification and removal

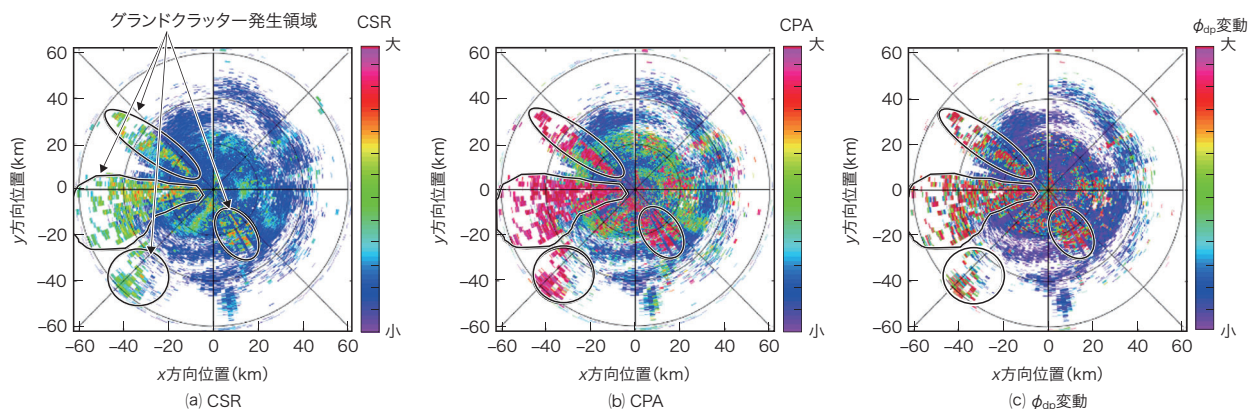


図2. グラウンドクラッター識別に用いられる代表的な特徴量

グラウンドクラッターと降水エコーは速度や分布特性が異なるため、特性が異なる特徴量が存在する。

Typical feature quantities for ground clutter identification

及び非適用の信号から降水強度推定に利用される強度・速度偏波情報を推定後、それらを品質管理処理に入力する。また、これらの信号から、CSR、及びCPA・ ϕ_{dp} の特徴量を算出する。クラッター識別処理では、特徴量を用いて観測データを3種類(降水エコー、グラウンドクラッター除去処理適用、無効値化処理適用)に識別し、識別フラグとして出力する。無効値化処理適用は、グラウンドクラッター除去処理では対応できないほど強いグラウンドクラッターを受けて、信頼性が損なわれた場合のフラグである。品質管理処理では、識別フラグに応じて、グラウンドクラッター除去処理非適用信号(降水エコー信号)、グラウンドクラッター除去処理適用信号、又は無効値化処理適用信号を選択して、出力する。

2.3 従来型グラウンドクラッター識別アルゴリズム

図4に、グラウンドクラッター識別処理で用いる、グラウンドクラッター識別アルゴリズムを示す。CSR、CPA、及び ϕ_{dp} 変動の各特徴量をしきい値と比較することで、観測データを識別する。しきい値は、識別精度を左右するため、この設定は重要である。グラウンドクラッター特性やレーダー設定はレーダーサイトごとに異なるため、サイトへ製品を出荷した後で、現地で専門技術者がデータを見ながら、しきい値を

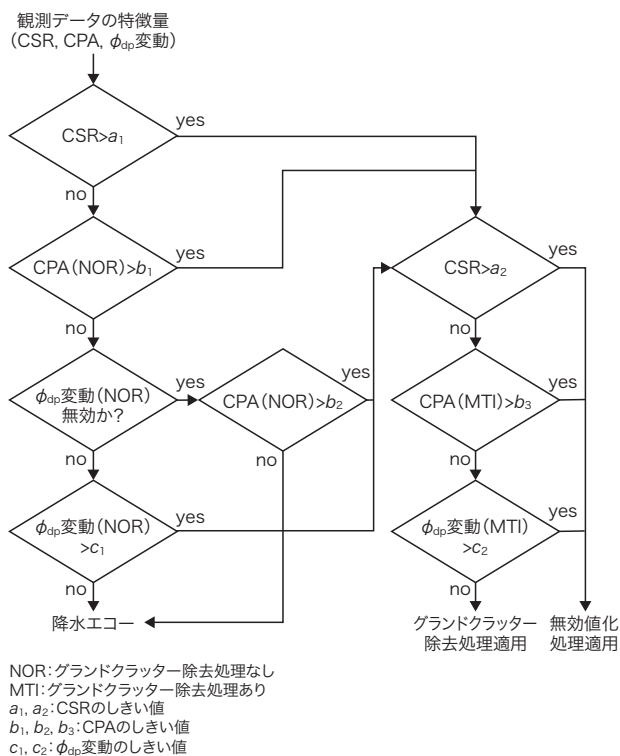


図4. 従来のグラウンドクラッター識別アルゴリズム

特徴量をしきい値と比較してデータを識別できるが、調整負荷が高いため、この軽減が課題である。

Conventional ground clutter identification algorithm

調整する。サイトでは、しきい値の調整だけでなく、送信波形検査や波面調整など多くの作業があり、負荷の低減が求められている。

3. 機械学習型グラウンドクラッター自動識別技術

グラウンドクラッター識別のしきい値調整の負荷を軽減するため、ニューラルネットワーク(NN: Neural Network)で構築した識別モデルを用いる、機械学習型グラウンドクラッター自動識別技術を開発した。

識別モデルをリアルタイムに更新しながら運用することは、ハードウェアリソースの観点から難しい。グラウンドクラッター特性は短期間で変化するものではないため、気象レーダーの現地調整時に取得した観測データで学習させた識別モデルを固定的に用いる。

識別モデルに学習させるには、着目点のデータにグラウンドクラッター除去処理が必要なのか、若しくは無効値化処理すべきなのかを正確に把握して、識別フラグを付けた学習用データが必要である。そこで、グラウンドクラッターと降水エコーの強度関係や発生位置が明確な学習用データを、自動で生成する技術を開発した(図5)。

晴天時のグラウンドクラッターだけの観測データと、降雨時に、仰角をやや大きくしてグラウンドクラッターが混入しにくい状態で取得したデータに前処理を加えることで降水エコーだけの観測データから、学習用データを合成する。更に、それぞれの学習用データのCSRを算出し、その値に応じて、次のとおりフラグを設定する。レーダーの設定で決まるグラウンドクラッター除去可能量 β を設定して、CSR<0 dBの場合は降水エコーフラグを、 $0 \leq \text{CSR} < \beta$ dBの場合はグラウンドクラッター除去処理適用フラグを、 $\text{CSR} \geq \beta$ dBの場合には無効値化処理適用フラグを、それぞれ立てる。この手法によ

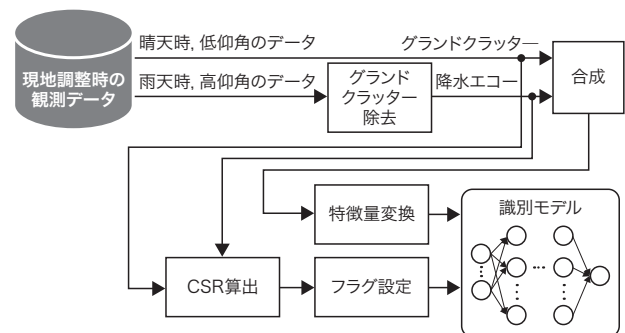


図5. 開発した学習用データ生成方法

グラウンドクラッターだけの受信データと降水エコーだけの受信データを合成し、グラウンドクラッター状態が既知の学習用データを生成する。

Newly developed method for training data generation

り、大規模な学習用データセットを容易に収集できる。

この学習用データセットを使って学習させることで、グラウンドクラッターの識別モデルが形成される。従来手法に比べて、大幅な負荷軽減につながる。

4. 識別性能評価

MP-PAWRの観測データを用いて、開発した識別モデルの性能を評価した。評価では、開発手法と従来手法で、同一の特徴量を用いて比較した。

図6に、開発手法と従来手法による識別例を、比較して示す。開発した機械学習型による識別結果は、正解値とよく一致している。従来手法による識別結果は、降水エコーの識別はおおむね良好だが、グラウンドクラッター除去処理を適用すべきデータの多くを無効値化処理適用と誤って識別している。

更に、識別性能を定量評価するため、識別フラグごとの的中率並びに空振り率を、表1に示す。的中率とは、識別フラグごとの正解データ数に対する正しく識別できたデータ数の比であり、空振り率とは、各識別フラグに識別されたデータ数に対する誤識別されたデータ数の比である。降水エコーフラグとグラウンドクラッター除去処理適用フラグの的中率と空振り率を見ると、開発手法は従来手法に比べて、的中率と空振り率を改善できることが分かる。また、開発手法では、これらの識別フラグの的中率が90%以上、空振り率が10%未満と高い性能を実現できている。無効値化処理適用フラグについては、開発手法の的中率と空振り率は42%と29.3%で高くはない。この原因として、無効値化処理適用フラグの学習用データ数が全学習用データの僅か1.5%と非常に少ないため、識別モデルの学習が十分で

表1. 識別的中率と空振り率

Results of tests of ground clutter identification accuracy and error rates

識別フラグ	的中率 (%)		空振り率 (%)	
	開発手法	従来手法	開発手法	従来手法
降水エコー	98.6	89.6	1.5	1.9
グラウンドクラッター除去処理適用	94.4	17.2	7.7	34.1
無効値化処理適用	42.0	98.5	29.4	93.7

きないこと、及び僅かな誤りでも数字上誤差が大きくなることが考えられる。学習用データが少ない場合の識別性能改善は、今後の課題である。なお、無効値化処理適用フラグについては、従来手法は的中率も空振り率も高い。これはグラウンドクラッター除去処理適用フラグのデータのほとんどを誤って無効値化処理適用フラグと判断しているためであり、従来手法で除去処理を行うと、過度にデータが除去されるおそれがある。

図7(a)に降水エコーとグラウンドクラッターを含む強度を、(b)に降水エコーだけの強度を示す。また、(a)を観測データとして入力し、図3のフローに従ってグラウンドクラッター識別・除去処理した場合の降水エコー強度を(c)と(d)に示す。(c)は開発手法で識別し、(d)は従来手法で識別した。なお、(c)と(d)は、降水エコーだけの強度である図7(b)に一致することが望ましい。

まず、(a)と(b)を比較すると、レーダー中心に対して西側や北西にグラウンドクラッターが発生している。更に(a)と(b)の強度の比較からCSRは5～30 dBと推測される。この検討で用いたレーダーでは、CSRが30 dB程度のグラウンドクラッターは信号処理により十分除去可能であるが、従来手法では、これらのグラウンドクラッターと降水エコーが重畳した領

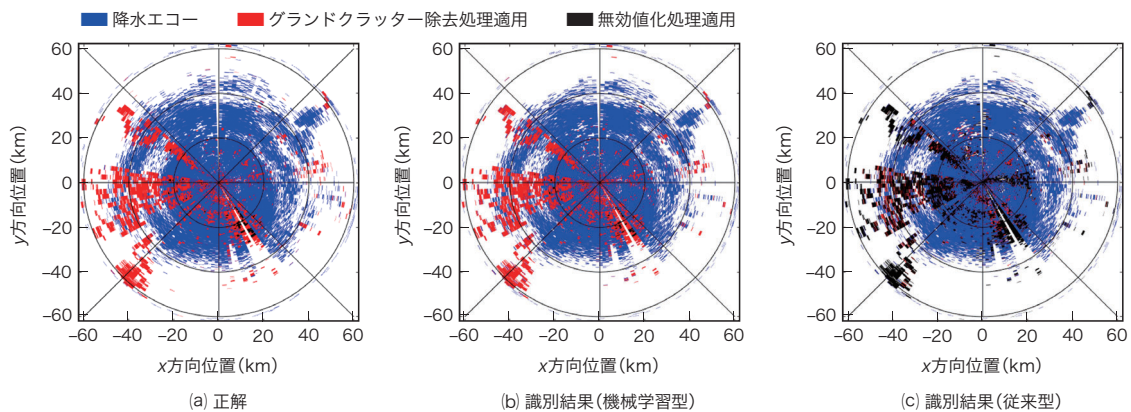


図6. 識別例

開発手法による結果と正解値は類似しており、適切な識別モデルを構築できた。

Examples of results of ground clutter identification

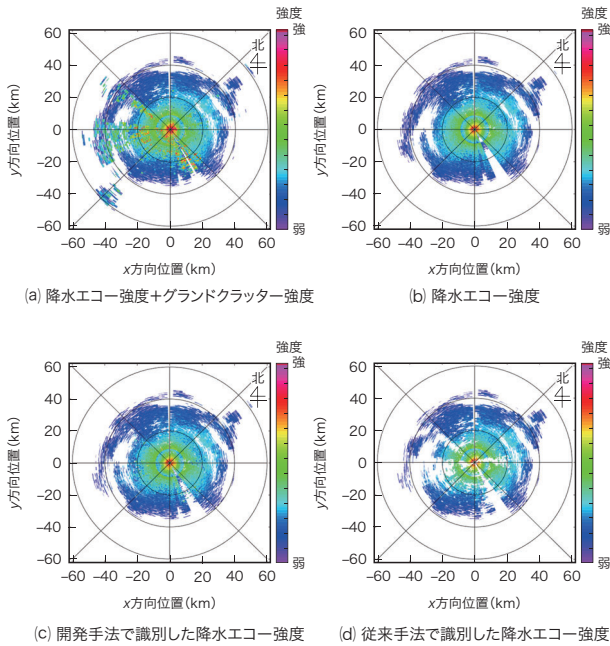


図7. 識別結果に基づく処理適用後の降水エコー強度

開発手法でグラウンドクラッターを適切に除去し、降水エコーだけの特性と同等の結果が得られることを確認した。

Results of estimations of precipitation echo power after removal of ground clutter based on results of ground clutter identification

域で無効値化処理が選択されたために、降水エコーのデータが消失してしまった(図7(d))。これに対して開発手法では、従来手法のような降水エコーの消失はほぼ見られず、グラウンドクラッターの強さに応じて適切な処理を行い、図7(b)に近い結果を得た(図7(c))。

これらから、開発手法は識別フラグを適切に識別し、識別精度が向上することを確認した。

5. あとがき

気象レーダーのグラウンドクラッター識別のしきい値調整負荷を軽減すべく、機械学習を用いたクラッター自動識別技術と、学習用データの自動生成技術を開発した。MP-PAWRの実際の観測データを使用して識別性能を評価したところ、従来手法に比べて同等以上の識別性能を実現でき、人手を省いてグラウンドクラッターを識別・除去できることを確認した。

今後は、シークラッターや生体クラッターなどのクラッターフラグの識別に加え、他レーダーや他システムからの干渉なども識別できるよう技術開発を進めていく。

この研究の一部には、内閣府 総合科学技術・イノベーション会議のSIP(戦略的イノベーション創造プログラム)の一つである「レジリエントな防災・減災機能の強化」(管理人：国立研究開発法人 科学技術振興機構(JST))で取

得られたデータを利用した。

文献

- (1) Kikuchi H. et al. Initial Observations for Precipitation Cores With X-Band Dual Polarized Phased Array Weather Radar. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing. 2020, 58, 1, p.3657–3666.
- (2) Yamauchi H. "Quality control of weather radar data by using dual polarization". WMO/ASEAN Training Workshop on Weather Radar Data Quality and Standardization. Bangkok, 2018-02. <https://www.jma.go.jp/jma/en/photogallery/WMO-ASEAN_Radar_Workshop_Feb2018/2-4-3_Weather%20radar%20data%20Quality%20Control_Dual-Pol%20QC.pdf>, (accessed 2022-07-05).



青木 朝海 AOKI Tomomi

研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
ワイヤレスシステムラボラトリー
電子情報通信学会会員
Wireless System Lab.



山口 恵一 YAMAGUCHI Keiichi, Ph.D.

研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
博士(工学)
Information and Communications Platform Lab.



木本 圭優 KIMOTO Yoshimasa

研究開発センター 情報通信プラットフォーム研究所
ワイヤレスシステムラボラトリー
電子情報通信学会会員
Wireless System Lab.