



廉価な VNA を利用した TDR 波形再現による土壌比誘電率の計測

小林大樹¹、徳山想奈²、登尾浩助²

Soil permittivity measurement using an inexpensive VNA-based TDR

Daiki KOBAYASHI¹, Sona TOKUYAMA² and Kosuke NOBORIO²

Abstract: Time-domain reflectometry (TDR) is a widely used method for accurately measuring soil moisture in the field. This technique determines the relative permittivity of the soil by analyzing the change in the propagation speed of electromagnetic waves through a soil probe. However, conventional TDR equipment is expensive, often costing approximately one million yen, which limits its accessibility. Affordable vector network analyzers (VNAs) such as NanoVNA have emerged as potential alternatives for TDR measurements. Studies have demonstrated that VNAs can reproduce TDR waveforms with comparable accuracy to conventional equipment by converting frequency-domain reflectometry (FDR) data into time-domain waveforms. For example, NanoVNA was introduced recently to measure soil permittivity using three-wire probes accurately. However, this procedure often requires knowledge of digital signal processing; furthermore, the detailed steps for reproducing the results have not yet to be fully documented, creating challenges for widespread adoption. This study aimed to explain the theoretical principles and experimental procedures for reproducing TDR waveforms using NanoVNA. The discussion includes the basics of FDR-to-TDR conversion using the inverse fast Fourier transform (IFFT) and practical considerations, such as calibration, probe configuration, and data processing. In addition, examples of TDR waveform reproduction are reviewed, illustrating the accuracy of air and water permittivity measured. To promote broader accessibility, we provide open-source Python code that enables users to convert NanoVNA data into TDR waveforms. This article may support researchers and engineers in adopting NanoVNA-based TDR measurements as a low-cost yet reliable alternative to conventional TDR systems.

Key Words : VNA, TDR, soil moisture content, relative permittivity, digital signal processing

1. はじめに

Time domain reflectometry (TDR) は、正確かつ簡便な現場での土壌水分量の一般的な計測手法である。TDR は土壌中のプローブを伝播する電磁波速度の変化から土壌比誘電率を計測する (Noborio, 2001)。比誘電率を Topp et al. (1980) に代表される変換式に代入することで体積含水率を精度良く求めることができる。土壌物理学分野の研究では広く使用される土壌水分量計測手法であるが、TDR 機器は 100 万円程度と高価である。一方、Moret-Fernández et al. (2022) は廉価な vector network analyzer (VNA) を使って精度の高い TDR 波形を再現し、土壌比誘電率を計測可能と報告している。

VNA は高周波数帯域の特性を評価するための測定機であり、電子回路やアンテナの特性評価に使用されている。従前、VNA は TDR 機器以上に高価な計測機であったが、Takahashi (2017) により安価な VNA の設計やファームウェアがオープンソースとして公開されたことで、価格が大幅に低減された。このオープンソースによる VNA は NanoVNA という名称で数万円程度から購入ができる。

Moret-Fernández et al. (2022) は NanoVNA を用いて 10 cm および 20 cm 長の 3 線式プローブを空气中、蒸留水中、異なる体積含水率を持つ土壌カラムに挿入して比誘電率を計測した。そして、NanoVNA による測定結果は一般的に使われている TDR 機器である TDR100 (Campbell Scientific 社製) の測定結果と遜色ないことを示した。Moret-Fernández et al. (2022) は NanoVNA で得た周波数領域データをデジタル信号処理することで TDR 波形を出力している。しかし、NanoVNA の具体的な使用法は論文に記載されていないことから、多くの研究者・技術者にとって初めて NanoVNA を使用する場合には試行錯誤に時間がかかるため、Moret-Fernández et al. (2022) の実験結果の再現は困難が伴うと考えられる。そこで、本解説では、デジタル信号処理に関する解析用プログラムを公開して、廉価な NanoVNA を使った TDR 波形再現法に関する原理や機器の使い方を解説し、普及を図ることを目的とする。

¹NTT Access Network Service Systems Laboratories, 1-7-1 Hanabatake, Tsukuba, Ibaraki, 305-0805, Japan. Corresponding author: 小林大樹, NTT アクセスサービスシステム研究所

²School of Agriculture, Meiji University, 1-1-1 Higashimita, Tama-ku, Kawasaki-shi, Kanagawa 214-8571, Japan.

2024 年 12 月 13 日受稿 2025 年 2 月 2 日受理

2. VNA とは

VNA は高周波回路やアンテナなどの回路網に信号を入力したときに生じる反射や透過に対する周波数応答 (Sパラメータ) を計測する装置である (藤井, 2010). VNA は2つのポートを有しており, 1つのポートだけに測定対象 (device under test, DUT) を繋ぐことで反射信号, 2つのポートで DUT を挟んで繋ぐことで透過信号を計測する. これらの信号は Sパラメータの形式で扱われ, Fig. 1 の通りポートの入出力に対応して S_{11} と S_{22} は反射信号, S_{21} は透過信号を示す. TDR 波形への変換では反射信号を使うため S_{11} もしくは S_{22} を用いる (以下では省略のため反射信号として S_{11} のみを記載する). S_{11} はタッチストーンファイル (.s1p) の形式で VNA から出力される. タッチストーンファイルは周波数 (Hz), 反射係数の実部, 反射係数の虚部で構成されるテキストデータである.

TDR は時間領域 (t) の反射係数を計測する機器である. 一方, VNA は周波数領域 (ω) の反射係数 (frequency domain reflectometry, FDR) を S_{11} として計測する機器である. NanoVNA において計測される $S_{11}(\omega)$ は周波数領域の複素反射係数を示すため, 複素反射係数 ρ と $\rho(\omega) \equiv S_{11}(\omega)$ の関係となる. 具体的に式 (1)

$$\rho(\omega) = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} \quad (1)$$

で表され, Z_L は複素数形の負荷インピーダンス (Ω), Z_0 はシステムの特異インピーダンス (通常は 50Ω) である (鈴木, 2003).

3. NanoVNA により TDR 波形を再現する 理論と付録プログラムの解説

解説元の論文 (Moret-Fernández et al., 2022) では線形時不変 (LTI) システム理論に基づき, FDR による TDR 波形の再現理論が厳密に述べられている. 一方で解説元の論文には, TDR 波形の再現で行うべき計算ステップについて記載が少ない. そこで, 本解説では詳細

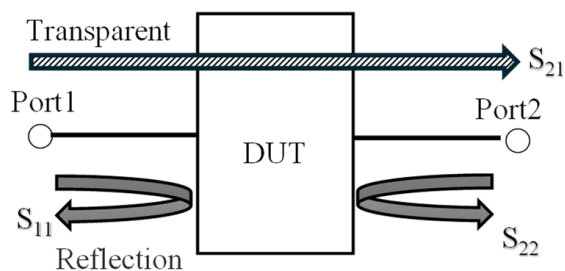


Fig. 1 Sパラメータの概要.
Overview of S-parameters.

な理論は Moret-Fernández et al. (2022) に譲り, 平易な理論解説と付録のプログラムにおいて実装した計算方法について述べる.

LTI システムにおいては, $\rho(\omega)$ を逆フーリエ変換 F^{-1} (inverse fast Fourier transform, IFFT) することで周波数領域から時間領域に変換され式 (2) の $\rho(t)$ を得る (Cerna and Harvey, 2000).

$$\rho(t) = F^{-1}[\rho(\omega)] \quad (2)$$

ここで, $\rho(t)$ はインパルス波形 (解説元の論文ではディラックデルタ関数 $\delta(t)$ として定義) が入力された際の応答である. 一方で, TDR 測定において励振信号はインパルス波形ではなく, ステップ波形である. そして, ステップ波形が入力されたときの時間領域の応答, すなわち TDR 波形 $\Gamma(t)$ は式 (3) となる (Moret-Fernández et al., 2022).

$$\Gamma(t) = \int_{-\infty}^t \rho(\tau) d\tau \quad (3)$$

以上の理論を元に付録プログラムを実装した. 付録のプログラムでは最初に $S_{11}(\omega)$ のデータ形式であるタッチストーンフォーマットを読み込む. そして, S_{11} を式 (2) の IFFT 処理により, $\rho(t)$ に変換する. 最後に式 (3) の通り $\rho(t)$ の累積和を計算することで $\Gamma(t)$ を求める.

4. NanoVNA の使い方と TDR 波形の 再現方法

ここでは, NanoVNA の使い方および TDR 波形の取得までの具体的な手順を解説する. NanoVNA はタッチスクリーンを有しており, 単独でも使用可能であるが, PC による操作も可能である. 筆者らはオープンソースのソフトウェアである NanoVNA-Saver (バージョン 0.64) を使用し, PC と接続することで, NanoVNA の制御からデータ保存までを PC 上で行った. まず, 測定に使用する周波数範囲 (掃引周波数範囲) を最小周波数 F_{\min} と最大周波数 F_{\max} を使って設定した. ここで TDR の時間分解能 $\Delta(t)$ は式 (4) であるので, F_{\max} は大きい方が TDR 波形の分解能が向上する (Moret-Fernández et al., 2022).

$$\Delta(t) = \frac{1}{2F_{\max}} \quad (4)$$

F_{\min} と F_{\max} は NanoVNA 本体の性能に依存する. Moret-Fernández et al. (2022) は F_{\min} と F_{\max} をその機種種の最小値, 最大値に設定することを推奨している. NanoVNA-Saver において F_{\min} と F_{\max} は, Sweep Control という項目内で設定できる.

次に最大測定距離 l_{\max} を設定する. l_{\max} はケーブル始点から TDR のプローブ終点までの距離より小さくする.

l_{\max} は式 (5) で表され, c は真空中での光速 ($= 3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$), ΔF は周波数分解能, v_f は速度係数 (一般的な 50Ω 同軸ケーブルでは $v_f = 0.66$) である.

$$l_{\max} = \frac{c}{\Delta F \times v_f} \quad (5)$$

なお, 比誘電率測定では土壌の実長を決定する訳ではないので $v_f = 1.0$ として解像度を上げることが推奨される (Noborio, 2001). そして, ΔF は式 (6) の通りデータポイント数 N から計算される (Moret-Fernández et al., 2022).

$$\Delta F = \frac{F_{\max} - F_{\min}}{N} \approx \frac{F_{\max}}{N} \quad (6)$$

式(5)で計算した l_{\max} が TDR のプローブ終点までの距離を上回れば TDR 波形を再現可能であるが, 波形の安定性のため $\Delta F > 10^5$ が推奨される (Moret-Fernández et al., 2022). N は NanoVNA-Saver の Serial port control \rightarrow Manage 中の Datapoints で設定可能である. また, 機種によっては Datapoints が固定長の場合がある. この時は Sweep Control の Segments の値を大きくすれば ΔF を調整できる. なお, NanoVNA-Saver 上の TDR の表示の中で Estimated cable length があり, 式による計算をせずとも l_{\max} が十分な長さであるか予測を付けることができる. しかし, NanoVNA-Saver に実装されているこの TDR 機能はケーブルの断線箇所を探すための機能であり, 土壌誘電率の計測には使用することはできない (Moret-Fernández et al., 2022) ことに注意が必要である.

次に NanoVNA のキャリブレーションを行った. NanoVNA におけるキャリブレーションの役割は「測定基準面の位置を定めること」と「測定基準面の Z_0 を定めること」の2つである (天川, 2016). キャリブレーションを実施しなければ, FDR 波形が不正確となるため, IFFT による時間領域への変換後の TDR 波形も不正

確となる. したがって, このキャリブレーションは必要不可欠である. キャリブレーション画面の設定に従って Open, Short, Load のキット (Fig. 2) をポート 1 に取り付けて計測をした. キャリブレーション結果は保存することもできるため, 同一条件であれば次回の計測では省略可能である. なお, キャリブレーション設定には Through も存在するが S_{11} 計測の場合には設定は不要である.

最後に Sweep Control 内の sweep を実行して, 計測を行なった. 計測終了後に Files から.s1p 形式で S_{11} 計測データをエクスポートした. エクスポートされた S_{11} は付録のプログラムを使って, TDR 波形に変換した.

まとめとして NanoVNA の設定画面を紹介する (Fig. 3). 赤枠は設定が必要な項目となっており, これらについて解説を述べた. なお, NanoVNA-Saver と NanoVNA のファームウェアのバージョンの組み合わせによっては, 正しく動作しないケースがある. 筆者らは NanoVNA のファームウェアを最新に更新することで, この問題を解決した経験がある. NanoVNA は回路設計が公開されているため, 様々なメーカーから NanoVNA と名前を冠して販売されている. 中には非常に安価な製品もあるが, メーカーのホームページからファームウェアの更新がなされていることなどサポート状況を確認してから購入することを薦める.

5. 計測例

NanoVNA の一種である VNA6000-A (HCXQS groups 社製) を用いて TDR 波形の再現をした (Fig. 4). $F_{\max} = 1.5 \text{ GHz}$ と 3.0 GHz の 2 台の NanoVNA を用いた Moret-Fernández et al. (2022) と異なり, 我々が使った VNA6000-A は $F_{\max} = 6.0 \text{ GHz}$ であるので, より高い時間分解能で TDR 波形を再現することが可能であった. 使用した TDR プローブは一般的に TDR で使用される仕様であるプローブ長 $L = 15 \text{ cm}$ の 3 線式とした (登尾, 2003). 特性インピーダンス 50Ω で長さは 8 m の同軸ケーブルをプローブに接続した. 同軸ケーブルの他端は TDR100 など既存の TDR 機器で使用することも想定して BNC コネクタを接続したので, NanoVNA との接続には SMA-BNC 変換コネクタを使用した. VNA6000-A の仕様に合わせて掃引周波数は $F_{\max} = 6.0 \text{ GHz}$, $F_{\min} = 50 \text{ kHz}$ とし, N は最大の $N = 1023$ とした.

プローブを空中 (室温 23°C) と水道水中 (水温 21°C) に設置し, S_{11} を計測した. 計測した S_{11} は Fig. 5 の通りであり, 周波数領域における反射係数の実部と虚部が得られた. そして, S_{11} を入力として, 付録のプログラムにより TDR 波形を出力した. TDR 波形の出力結果を Fig. 6 に示す. Fig. 6 において Noborio (2001) にないプローブの始点 (L_s) と空中・水中の見かけのプローブ終点 ($L_{\text{air}}, L_{\text{water}}$) を判定した. さらに, それぞれの始点

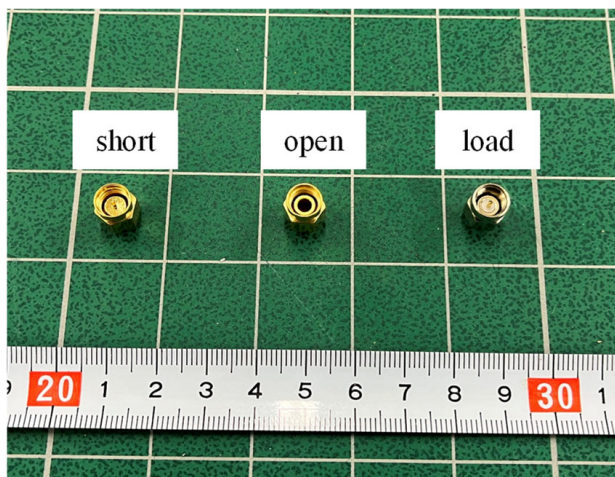


Fig. 2 NanoVNA のキャリブレーションキット.
A NanoVNA calibration kit.

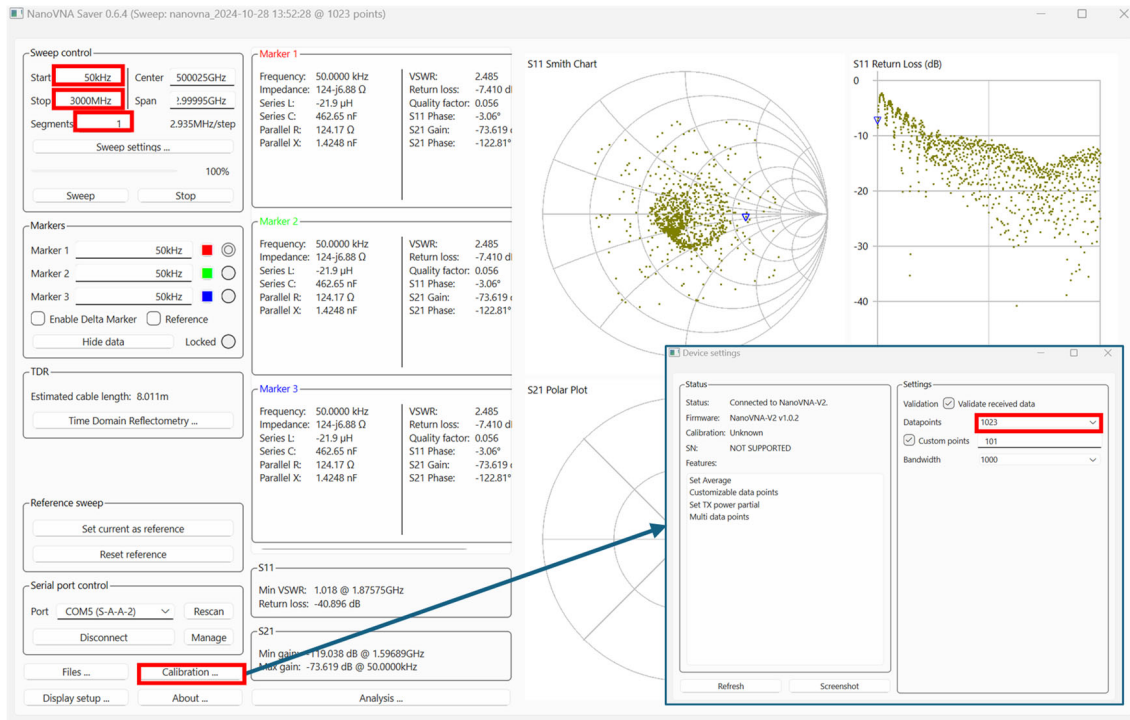


Fig. 3 NanoVNA の設定画面。赤枠内は TDR 波形の再現時に設定が必要な項目。

NanoVNA configuration screen. The items within the red frame are the settings required for TDR waveform reproduction.

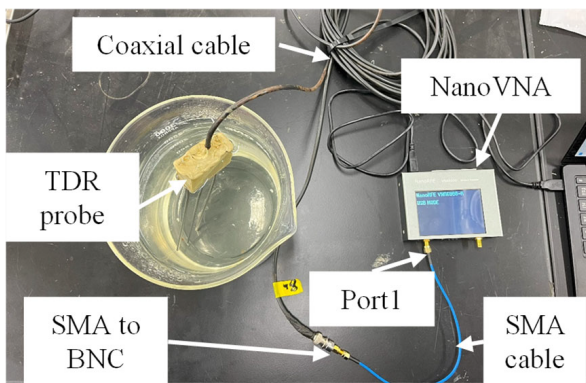


Fig. 4 NanoVNA による TDR 波形再現実験の様子。Overview of the TDR waveform reproduction experiment using a NanoVNA and a three-wire probe.

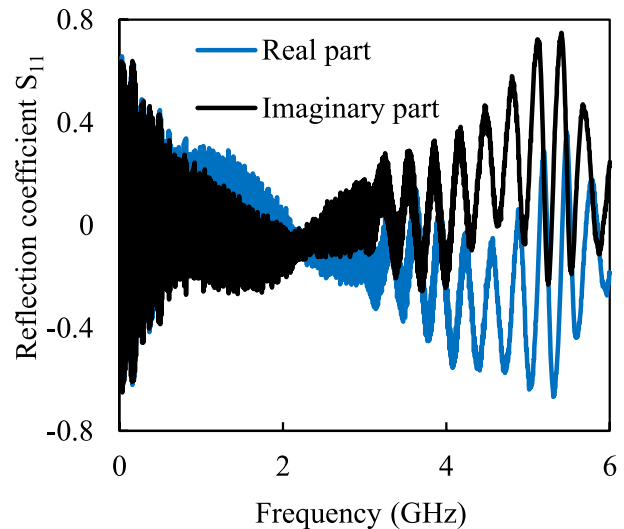


Fig. 5 NanoVNA で計測した S_{11} . S_{11} measured with the NanoVNA.

・ 終点から見かけのプローブ長 L_a を求めて式 (7) により比誘電率 ϵ を計算した (Noborio, 2001). 同軸ケーブルは一般的な 50Ω のケーブルのため $v_f = 0.66$ とした。

$$\epsilon = \left(\frac{L_a / v_f}{L} \right)^2 \quad (7)$$

その結果, 空気は $\epsilon = 0.92$, 水は $\epsilon = 80$ であった。それぞれの理論上の値と概ね等しいため, 正しく ϵ を計測したと評価できる。

6. おわりに

数万円で購入可能な NanoVNA を使って TDR 波形を再現する方法 (Moret-Fernández et al., 2022) について解説をした。キャリブレーションや NanoVNA の設定を正しく行い, 付録のプログラムによるデジタル信号処理を行うことで, 空気と水の測定を通じて NanoVNA を用いた TDR 波形再現が理論値と一致することを確認した。なお, 土壌誘電率の計測を目的とした TDR による計測に比べて NanoVNA による TDR 波形再現は,

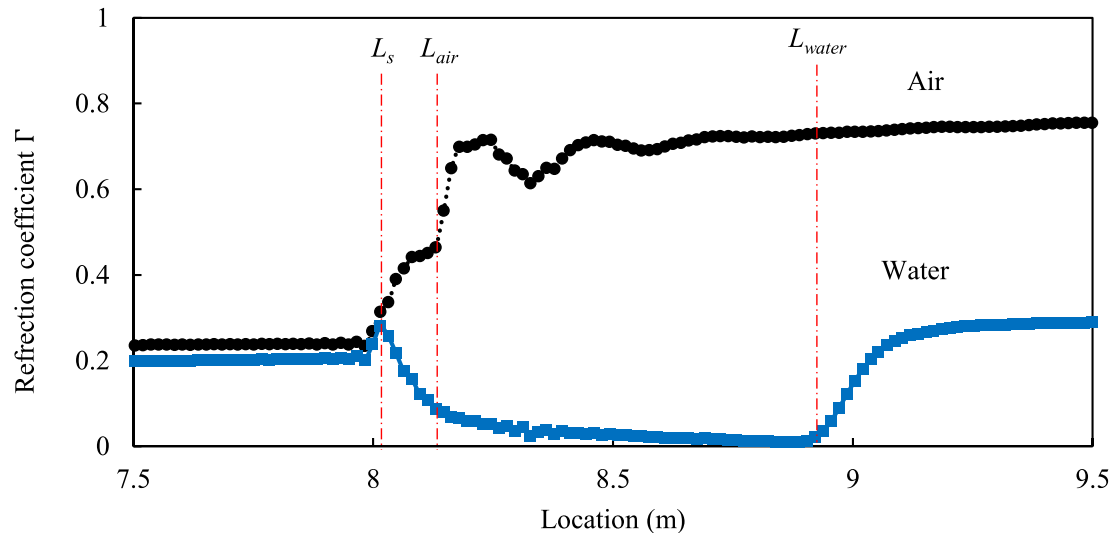


Fig. 6 NanoVNA による TDR 波形の再現結果プローブが空気中にあるときを Air, 水中を Water で示す. L_s はプローブ始点, L_{air} は空気中にあるときの見かけ上の終点, L_{water} は水中にあるときの見かけ上の終点を示す.

Results of TDR Waveform Reproduction using the NanoVNA. The experiment was conducted with a three-wire probe in two cases: in the air and water. L_s represents the starting point of the probe, L_{air} denotes the apparent endpoint in the air, and L_{water} denotes the apparent endpoint in water.

計測の時間分解能が低くなる (Moret-Fernández et al., 2022). したがって, プローブの長さや測定に使用する周波数によっては, NanoVNA による TDR 波形再現の精度が低くなる可能性がある. したがって, NanoVNA が TDR と同等の土壌比誘電率測定を実現する条件については, 研究の余地が残されているといえる. 本解説では, PC との接続を前提に解説したがシリアル通信などが実装された NanoVNA と Raspberry Pi などの小型コンピューターを使用することで, 現場で連続測定可能なロガーの作成も可能である. 本解説により土壌物理学研究の一助になることはもちろん, その他分野の研究者・技術者・実務者にも NanoVNA を使った TDR 計測が広まるきっかけとなることを期待する.

付録

計測例で使用した TDR 波形解析プログラムを公開する. このプログラムは NanoVNA からエクスポートしたタッチストーンファイル (.s1p) を TDR 波形に変換する Python コードである. 下記 URL のサイトからダウンロード可能である.

URL: <https://github.com/kobayashid/FDR2TDR>

引用文献

天川修平 (2016): 続 S パラメータ利用の落とし穴 — VNA キャリブレーションとは何か (穴にはまった人からの報告) — MWE 2016, p. FR6A-1.

Cerna, M. and Harvey, A.F. (2000): The fundamentals of FFT-based signal analysis and measurement. Application Note 041, National Instruments.

藤井勝巳 (2010): 周波数領域の信号計測技術 ネットワークアナライザ編. 電子情報通信学会 通信ソサイエティマガジン, 2010(14): 14_60-14_68.

Moret-Fernández, D., Lera, F., Latorre, B., Tormo, J. and Revilla, J. (2022): Testing of a commercial vector network analyzer as low-cost TDR device to measure soil moisture and electrical conductivity. CATENA, 218: 106540.

Noborio, K. (2001): Measurement of soil water content and electrical conductivity by time domain reflectometry: a review. Computers and Electronics in Agriculture, 31(3): 213–237.

登尾浩助 (2003): 実践 TDR 法活用 — 土壌中の水分・塩分量の同時測定 —. 土壌の物理性, 93: 57–65.

鈴木茂夫 (2003): わかりやすい高周波技術入門. 日刊工業新聞社. p. 138.

Takahashi, T. (2017): NanoVNA — Handheld Vector Network Analyzer. GitHub Repository. Available at <https://github.com/ttrftech/NanoVNA>

Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980): Electromagnetic determination of soil water content: Measurements in coaxial transmission lines. Water Resources Research, 16(3): 574–582.



This article is an open access article under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

要 旨

TDR (time domain reflectometry) は現場での土壌水分計測に広く使用されているが、機器が高価である。近年は廉価な VNA (vector network analyzer) が販売されており、特に NanoVNA を使って TDR 波形を精度良く再現して土壌比誘電率を計測した報告例がある。しかし、NanoVNA の具体的な使用法は論文に記載されていないことから、多くの研究者・技術者が初めて NanoVNA を使用する場合には試行錯誤に時間がかかり、実験結果の再現には困難が伴うと考えられる。そこで、NanoVNA を使った TDR 波形の再現法に関する原理や機器の使い方を解説した。また、筆者らによる TDR 波形の再現例を紹介した。さらに、多くの人々への本法の普及を図ることを目的として、必要な解析プログラムを公開した。

キーワード：VNA, TDR, 土壌水分量, 比誘電率, デジタル信号処理