

電力機器設備診断のための 小型電磁波センシングシステムの開発

川田 昌武¹

Development of Small Radio Sensing System for Diagnosis of Electric Power Equipment

by
Masatake KAWADA

Partial discharge (PD) is a symptom of insulation degradation of electric power apparatus and facilities. This paper shows a new small receiver for detecting the electromagnetic waves emitted from PD. The receiver has an analog to digital converter (ADC) with 8 bits and a field programmable gate array (FPGA). It is confirmed that the receiver synchronously can obtain two signals generated by using a generator. The comparison of dynamic range of the receiver and spectrum analyzer (SA), which has been widely used, and the investigation of effect of pulse repetition frequency (PRF) are carried out.

Keywords : Partial Discharge, Electromagnetic Waves, Radio Sensing, Interferometry, Electric Power Apparatus and Facilities

1. まえがき

電力機器・設備の絶縁材料の劣化に伴って生じる部分放電 (PD: Partial Discharge) は、広帯域電磁波を放射すると報告されており、電磁波センシング技術による電力機器・設備の絶縁診断技術が重要となっている⁽¹⁾。また、ガス絶縁開閉装置 (GIS: Gas Insulated Switchgear) や配電線碍子、発電機固定子巻線等における PD による絶縁診断技術が報告されている^{(1)~(8)}。

絶縁破壊を未然に予知するには PD 発生位置の特定を行うことが有用であり、PD による放射電磁波の到来方向特定に複数アンテナへの到達時間差 (位相差) を利用した電

波干渉法をこれまでに報告している⁽¹⁾⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

本申請研究では PD から放射される電磁波を受信解析する小型電磁波センシングシステムの開発を進めるための基礎研究として、受信部に小型受信器 (ADC: Analog to Digital Converter, FPGA: Field Programmable Gate Array) 内臓) を導入し、その動作確認を行った。また、高周波計測において一般的に用いられているスペクトラムアナライザと本システム仕様 (8bits ADC) での PD のパルス繰り返し周波数 (PRF: Pulse Repetition Frequency) に対する受信出力の比較を行った (実験比較では発信器, デジタルオシロスコープを利用)。比較結果から、本受信器の出力特性はスペクトラムアナライザの周波数分解能 (RBW: Resolution Bandwidth) が PRF より低い場合 (RBW < PRF) と

¹ 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
Socio Techno Science
Graduate School of Engineering,
The University of Tokushima
連絡先: 〒770-8506 徳島市南常三島町 2-1

同じであることを確認した。逆の場合(RBW>PRF)にはスペクトラムアナライザの受信感度が本システムと比較して向上することを示した。

2. 小型受信システム

図1に電波干渉法の原理を示す。なお、同図はPDから放射電磁波を2本のアンテナ(アンテナ間隔 d)で受信している状況を示している。この到来角 θ と到達時間差 τ の関係は

$$\theta (= n\Delta\theta) = \cos^{-1}\left(c\frac{\tau}{d}\right) = \cos^{-1}\left(c\frac{n\Delta t}{d}\right) \quad (1)$$

である。式(1)の c は光速(電磁波の伝搬速度=2.99792458 $\times 10^8$ [m/s])、 Δt は受信器のサンプリング時間間隔、 n は取得ポイント数である。

式(2)は2つの信号の各周波数における位相差を求め、到来角を算出する方法である。

$$\theta = \frac{c}{2\pi f} \cos^{-1} \phi_{12} = \frac{c}{2\pi f} \cos^{-1}(\phi_1 - \phi_2) \quad (2)$$

ここで、 ϕ_1 、 ϕ_2 はそれぞれの受信信号の高速フーリエ変換(FFT: Fast Fourier Transform)から求めた各周波数 f の位相であり、この位相差から到来角を求める方法である。試作の電波干渉計システムを図2に示す。

本研究課題ではこの受信部の小型化を目的として図3に示す受信器を導入し、その動作確認を行った。なお、仕様を表1に示す。動作確認としては、発信器からの信号(2MHz 正弦波)を入力し、その信号を本受信器2チャンネルで同時受信した。図4に受信波形を示す。同図より、同じ波形が2チャンネル同時に入力されており、動作確認ができています。この受信波形をもとに時間差、位相差を算出することで電磁波到来角が式(1)あるいは式(2)より求まる。

3. 受信器の感度に関する検討 (スペクトラムアナライザとの比較による)

3.1 ダイナミックレンジの比較⁽¹¹⁾

本研究課題では汎用のデジタルオシロスコープの代わり

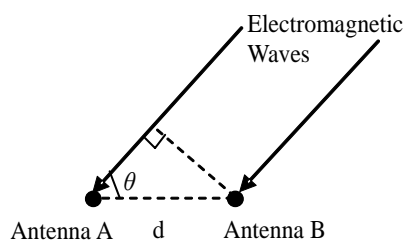


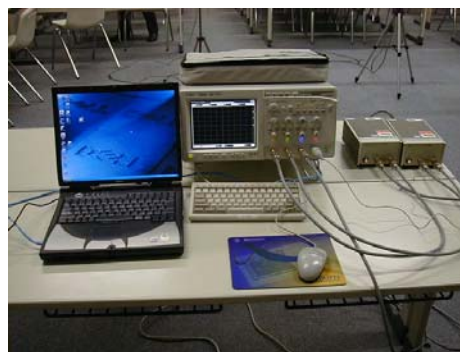
図1 電波干渉法の原理

Fig.1 Principle of Interferometry



(a) アンテナ部

(a) Antenna



(b) 受信, 処理部

(b) Receiver and processing unit

図2 電波干渉計システム

Fig.2 Interferometry System



図3 受信器

Fig.3 Receiver

表1 受信器の仕様

Table 1 Specifications for receiver

Product Name	National Semiconductor ADC08D1500DEV
Clock Frequency	200MHz to 1.5GHz
Range	(Max 1.5GSPS operation)
Channel	2 ch
Memory	4K Bytes per channel
Processor	Xilinx Virtex 4 FPGA
Size	190mm×12.6mm×3.5mm

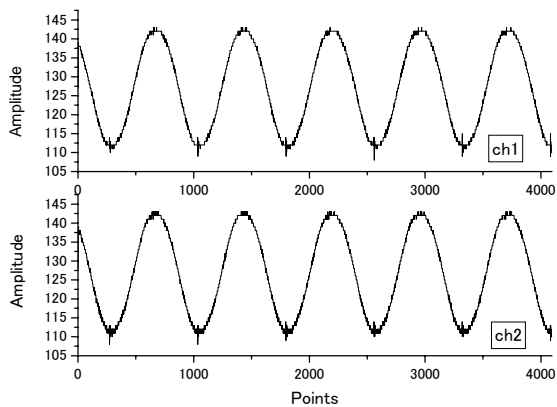


図4 正弦波受信結果

Fig.4 Result of obtaining sinusoidal waves by using ADC

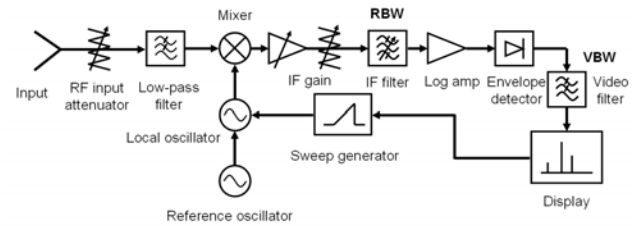


図5 スーパーヘテロダイン・スペクトラムアナライザの回路構成

Fig.5 The block diagram of superheterodyne spectrum analyzer⁽¹²⁾

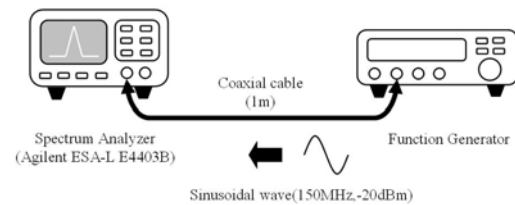


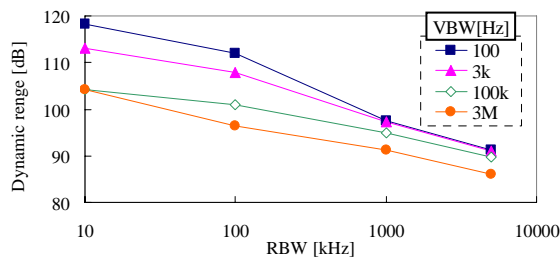
図6 スーパーヘテロダイン・スペクトラムアナライザのRBW, VBWによる特性評価

Fig.6 Evaluating the measurement results with respect to the RBW and VBW of superheterodyne spectrum analyzer

に図3に示す受信器（ADC, FPGA 内蔵）を用いることにより小型化できることを示した。

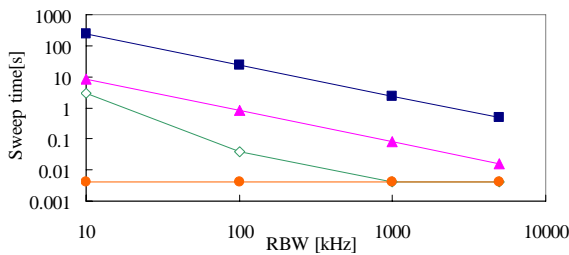
PDの放射電磁波計測においては、スペクトラムアナライザがデジタルオシロスコープと同様に利用されていることから、スペクトラムアナライザとADCとの比較を受信感度に関して行った。

図5はスペクトラムアナライザ (Superheterodyne Spectrum Analyzer) の回路構成である。スペクトラムアナライザによる計測においては、分解能帯域幅 (RBW: Resolution Bandwidth) とビデオフィルタ帯域幅 (VBW: Video Bandwidth) が重要となる。なお、RBWは同図の中間周波数フィルタ (IF Filter: Intermediate Frequency Filter) の周波数帯域幅である。これらの周波数帯域幅は掃引時間とダイナミックレンジ (Dynamic Range) を決定する⁽¹²⁾。なお、ダイナミックレンジは測定の振幅範囲を決めるものである。



(a) ダイナミックレンジと RBW, VBW との関係

(a) Relationship between dynamic range and RBW at different VBW.



(b) 掃引時間と RBW, VBW との関係

(b) Relationship between sweep time and RBW at different VBW.

図 7 RBW, VBW による計測特性比較

Fig.7 The effect of RBW and VBW

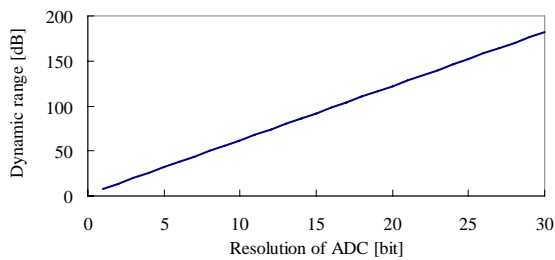


図 8 ADC のビット数とダイナミックレンジの関係

Fig.8 The dynamic range of ideal ADC

スペクトラムアナライザのダイナミックレンジは以下の式(3)で表せる。

$$Dynamic\ range = 10 \log_{10} \frac{P_{max}}{P_{min}} \quad (3)$$

ここで P_{max} は最大電力で P_{min} は最小電力である。図 6 の計測によりスペクトラムアナライザの RBW と VBW の

影響を調べた。図 7 に RBW と VBW の各値とダイナミックレンジ、掃引時間との関係を示す。同図より RBW を大きくするとダイナミックレンジが低下、掃引時間が減少するという関係が分かる。また、VBW の影響として、VBW を大きくすると、ダイナミックレンジが低下、掃引時間が減少することが分かる。

n ビットの ADC のダイナミックレンジは下記のように表せる⁽¹³⁾。

$$Dynamic\ range = 20 \log_{10} (2^{n-1} \sqrt{6}) \quad (4) \\ = 6.02n + 1.76$$

この式(4)よりビットとダイナミックレンジの関係を示すと図 8 となる。同図と式(4)より本研究課題で提案する 8bits ADC による受信器は 50dB 程度のダイナミックレンジであることが分かる。

3.2 パルス繰り返し周波数(PRF)に対する出力特性⁽¹⁴⁾

実際の PD は単一パルスではなく、複数のパルスが連続して発生する。すなわち、パルスの繰り返し周波数(PRF: Pulse Repetition Frequency)による影響も検討する必要がある。本受信器は ADC により時間領域での波形が得られる。一方、スペクトラムアナライザでは、この PRF により出力が異なる。なお、本受信器とスペクトラムアナライザの出力を比較する場合、スペクトラムアナライザの RBW と PRF との関係把握することは重要である^{(15)~(17)}。

図 9 に PRF と RBW の関係を示す。同図(a)では、単一の周波数スペクトラムライン (線スペクトル) が RBW の帯域に 1 本存在しているのみであることから、周波数スペクトラムは正しく求められる。しかしながら、同図(b)の場合には、多くの周波数スペクトラムラインが、RBW の帯域に存在することから、実際の計測値より大きな値が表示される。

そこで、上記の PRF の影響を考慮して、スペクトラムアナライザと本提案受信器(入力 8bit のデジタルオシロスコープで代用)の特性比較を実施した。なお、入力信号として、周波数 300MHz、出力-20dBm の正弦波を搬送波とし、パルス幅 $1\mu s$ でパルス変調した信号を用いた。

図 10 に PRF による出力結果への影響を示す。なお、減

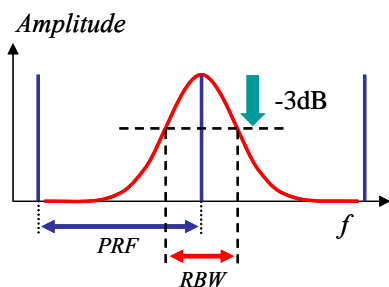
衰理論値 α はパルス幅を τ として以下の式(5)より求まる。

$$\alpha = 20 \log_{10}(\tau \times PRF) \quad [\text{dB}] \quad (5)$$

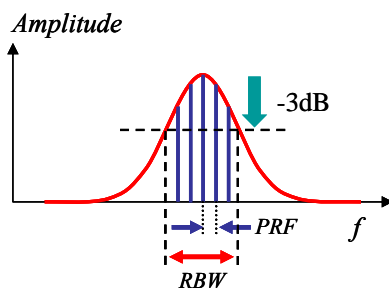
同図より、スペクトラムアナライザの RBW より PRF が大きい場合(RBW<PRF)、スペクトラムアナライザの計測値はデジタルオシロスコープと同様の傾向になる。すなわち、本提案受信器と同様となる。これとは逆に RBW より PRF が低い場合 (RBW>PRF)、スペクトラムアナライザの計測値は実際より大きくなることを示しており、スペクトラムアナライザの計測値の補正が必要である。なお、低い PRF の場合は絶縁材料劣化の初期(PD パルス数が少なく、発生間隔が長い)と対応する⁽¹⁸⁾。

4. おわりに

本申請研究では PD から放射される電磁波を受信解析する小型電磁波センシングシステムの開発を進めるための基礎研究として、受信部に小型受信器を導入し、その動作確認を行った。また、本受信器と汎用スペクトラムアナライザのダイナミックレンジ、パルス繰り返し周波数 (PRF) の特性比較を行った。



(a) PRF > RBW



(b) PRF < RBW

図9 PRF と RBW の関係
Fig.9 Relationships between PRF and RBW⁽¹⁵⁾⁻⁽¹⁷⁾

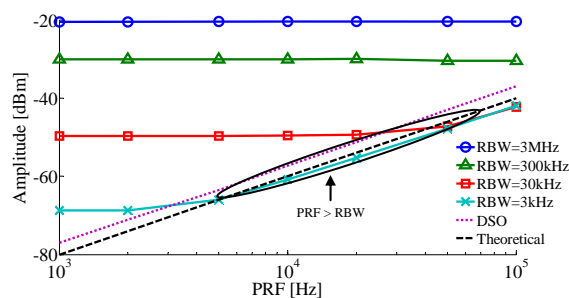


図10 PRFによる表示出力結果への影響 (300MHz)
Fig.10 Effect of PRF on amplitude of 300MHz frequency spectrum

謝辞 本研究は、平成19年度徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部研究プロジェクトとして実施致しましたことを付記し、謝意を表します。

文 献

- (1) M. Kawada : Fundamental Study on Locating Partial Discharge Source using VHF-UHF Radio Interferometer System, T. IEE Japan, Vol.122-B, No.5, pp.629-636 (2002-5) (in Japanese)
川田昌武 : VHF-UHF 帯電波干渉計システムによる部分放電源特定のための基礎研究, 電学論 B, 122, 5, pp.629-636 (2002-5)
- (2) M. Hikita : Future Trend of Discharge Measurement Technique for Diagnosis of Insulation Performance of Electric Power Apparatus", T. IEE Japan, Vol.121-B, No.6, pp.695-698 (2001-6) (in Japanese)
匹田政幸 : 電力機器の絶縁診断における部分放電測定技術の動向, 電学論 B, 121, 6, pp.695-698 (2001-6)
- (3) H. Maekawa, M. Doi, and S. Kawamoto : Identification for Sources of Partial Discharge in Gas Insulated Switchgears, T. IEE Japan, Vol.120-B, No.8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9) (in Japanese)
前川洋, 土井雅史, 川本俊治 : ガス絶縁開閉装置における部分放電源の同定, 電学論 B, 120, 8/9, pp.1106-1111 (2000-8/9)
- (4) H. Tsutada, N. Nagata, M. Miyashita, M. Kamei, S. Inoue, K. Takashima, and T. Usami : Detection of Partial Discharge Using First Peak Height and Cumulative Wave Parameter of Internal Electromagnetic Wave in GIS, T. IEE Japan, Vol.120-B, No.3, pp.333-339 (2000-3) (in Japanese)
葛田広幸, 長田典子, 宮下信, 亀井光仁, 井上悟, 高嶋和夫, 宇佐美照夫 : GIS 内部電磁波の第一波高値と累積波形指標を用いた部分放電識別, 電学論 B, 120, 3, pp.333-339 (2000-3)
- (5) Y. Suzuki, M. Kawada, Z. Kawasaki, K. Matsuura, and M. Kawasaki : Location of Partial Discharge by Superimposed Positioning Optimization on the Time Delay of Arrival, T. IEE Japan, Vol.118-B, No.2, pp.157-163 (1998-2) (in Japanese)
鈴木雄一, 川田昌武, 河崎善一郎, 松浦度士, 川崎誠 : 位置標定における重畳最適化法を用いた部分放電源空間標定, 電学論 B, 118, 2, pp.157-163 (1998-2)
- (6) A. Tungkanawanich, Z. Kawasaki, and K. Matsuura : Location of Multiple PD Sources on Distribution Lines by Measuring Emitted Pulse-Train Electromagnetic Waves, T. IEE Japan, Vol.120-B, No.11, pp.1431-1436 (2000-11)
- (7) C. H. Peck and P. J. Moore : A Direction-Finding Technique for Wide-Band Impulsive Noise Source, IEEE Trans. on Electromagnetic Compatibility, Vol.43, No.2, pp.149-154 (2001-5)
- (8) H. Okubo : Recent Research Activity and Future Trend of Electrical Insulation Diagnostic Technique for Electric Power Apparatus, T. IEE

- Japan, Vol.119-B, No.4, pp.434-437 (1999-4) (in Japanese)
大久保仁：電力機器の診断技術の現状と今後の課題，電学論 B, 119, 4, pp.434-437 (1999-4)
- (9) H. Ishimaru, and M. Kawada : Fundamental Study on Direction Finding Technique for Electromagnetic Waves Emitted from a Partial Discharge using Bayesian Network, T. IEE Japan, Vol.125, No.2, pp.177-183, (2005-2) (in Japanese)
石丸宏一，川田昌武：ベイジアンネットワークによる部分放電放射電磁波の方位角推定法に関する基礎研究，電学論B, 125, 2, pp.177-183, (2005-2)
- (10) H. Ishimaru and M. Kawada : Location Technique for Multiple Partial Discharge Sources Using Independent Component Analysis and Direction of Arrival Method of Electromagnetic Waves Based on Bayesian Network, T. IEE Japan, Vol.126, No.12, pp.1247-1254, (2006-12)(in Japanese)
石丸宏一，川田昌武：独立成分分析とベイジアンネットワークを適用した電磁波到来角推定法による複数部分放電源の位置標定，電学論 B, 126, 12, pp.1247-1254, (2006-12)
- (11) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : On the Measurement of Power of Electromagnetic Waves Emitted from Partial Discharge Using Superheterodyne Spectrum Analyzer, 2007 Shikoku-section Joint Convention Record of the Institutes of Electrical and related Engineers, (2007-9)
- (12) Hewlett-Packard Application Note 150, Spectrum Analysis Basics, (2006-8)
- (13) D. A. Rauth and V. T. Randal : Analog-to-Digital Conversion, IEEE Instrumentation & Measurement Magazine, Vol. 8, Issue 4, pp.44-54, (2005-10)
- (14) T. Murayama, M. Kawada, and K. Isaka : Investigation of the Relationship between Resolution Bandwidth of Spectrum Analyzer and Pulse Repetition Frequency for the Measurement of Power of EM Waves Emitted from PD, The 2008 Annual Meeting Record of IEE Japan, (2008-3)
- (15) W. Schaefer: Understanding Impulse Bandwidth Specifications of EMI Receivers, IEEE, International Symposium on Electromagnetic Compatibility, Seattle, pp.958-961, (1999)
- (16) M. Hiramatsu, L. Hamada, and T. Iwasaki : Effect of Resolution Bandwidth of Spectrum Analyzer and its Correction in the Measurement of Electromagnetic Pulses, National Convention of IEEEJ, p.166, (2004-3)(in Japanese)
平松宗之，浜田リラ，岩崎俊：スペクトラムアナライザによるパルス状電磁波の測定における中間周波帯域の影響の補正，平成16年電気学会全国大会，p.166, (2004-3)
- (17) Hewlett-Packard Application Note 150-2, Spectrum Analysis –Pulsed RF, (1971)
- (18) H. Okubo and N. Hayakawa : A Novel Technique for Partial Discharge and Breakdown Investigation Based on Current Pulse Waveform Analysis, IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation, vol.12, No4, pp.736-744, (2005-9)