Dissertationsreihe EMV

Analyse von HPEM-Störungseffekten in Computer-Netzwerken

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN

Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation
von Herrn

Dipl.-Ing. Matthias Kreitlow
geboren am 17. Februar 1982 in Rotenburg (Wümme)

2019

Gottfried Wilhelm Leibniz
Universität Hannover
Institut für Grundlagen der
Elektrotechnik und Messtechnik

Analyse von HPEM-Störungseffekten in Computer-Netzwerken

Von der Fakultät für Elektrotechnik und Informatik
der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur
(abgekürzt: Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Herrn

Dipl.-Ing.
Matthias Kreitlow

geboren am 17.02.1982
in Rotenburg (Wümme)

2019

1. Referent:	Prof. Dr.-Ing. Heyno Garbe
2. Referent:	Prof. dr. ir. ing. Frank B. J. Leferink
Vorsitz:	Prof. Dr.-Ing. Holger Blume

Tag der Promotion:	28. Mai 2019

Berichte aus der Elektrotechnik

Matthias Kreitlow

Analyse von HPEM-Störungseffekten in Computer-Netzwerken

Shaker Verlag
Düren 2019

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über http://dnb.d-nb.de abrufbar.

Zugl.: Hannover, Leibniz Univ., Diss., 2019

Copyright Shaker Verlag 2019
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6862-7
ISSN 0945-0718

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren
Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort

Diese Arbeit entstand als externer Doktorand am Institut für Grundlagen der Elektrotechnik und Messtechnik der Leibniz Universität Hannover. Während dieser Zeit war ich hauptberuflich am Wehrwissenschaftlichen Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz (WIS) in Munster als Dezernent tätig.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Heyno Garbe für die Betreuung auf dem Entstehungsweg dieser Dissertation. Vor allem danke ich für das entgegengebrachte Vertrauen, die hilfreichen Diskussionen und die stetige fachliche Förderung. Außerdem bedanke ich mich bei Herrn Professor dr. ir. ing. Frank Leferink für seinen Einsatz als Zweitgutachter und Herrn Professor Dr.-Ing. Holger Blume für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Ebenso danke ich dem Institutsleiter des WIS Herrn Direktor und Professor Dr. Winfried Schuhn für die Unterstützung meiner Forschungstätigkeiten im dienstlichen Interesse. Ohne den Zugriff auf die Labore des WIS und wissenschaftliche Freiräume wäre es mir nicht möglich gewesen, diese Dissertation anzufertigen und die Ergebnisse meiner Forschung zu präsentieren.

Herrn Dr. Frank Sabath danke ich besonders dafür, dass ich durch ihn die internationale High-Power-Electromagnetics-Familie kennengelernt habe und herzlich aufgenommen wurde. Seine Wertschätzung meiner Forschung, sein persönliches Netzwerk und der ständige fachliche Austausch haben diese Arbeit zu jeder Zeit positiv beeinflusst.

Zudem gilt mein Dank meinen ehemaligen Geschäftsfeldmanagern. Durch Herrn Dipl.-Phys. Berthold Römer habe ich mir in der Elektromagnetik viel praktisches Wissen aneignen können und jederzeit einen erfahrenen Ansprechpartner vorgefunden. Bei Herrn Dr.-Ing. Ronald Rambousky bedanke ich mich dafür, dass er mich von Anfang an zu einer Promotion ermutigt hat. Seine Unterstützung für meine Tätigkeiten und sein regelmäßiger Zuspruch waren immer wieder eine große Motivation.

Für sein außergewöhnliches Engagement danken möchte ich außerdem Herrn Dipl.-Ing. (FH) André Bausen, der mich bei nahezu allen Tätigkeiten im Labor jederzeit hervorragend unterstützt hat. Ohne seine Hilfe wäre diese Arbeit nicht so fruchtbar gewesen. Auch Dipl.-Ing. (FH) Horst Schubert gebührt mein Dank für die erfolgreichen und freudigen Stunden im High-Power-Microwave-Simulator. Weiterhin möchte ich mich bei allen weiteren Kollegen von beiden Instituten bedanken, die mich auf meinem Weg begleitet haben.

Zum Schluss möchte ich noch meiner lieben Familie danken, die ausnahmslos hinter mir steht. Ohne ihr Zutun wäre diese Arbeit gewiss nicht entstanden.

Matthias Kreitlow

Kurzfassung

Vernetzte Computersysteme können durch vorsätzliche elektromagnetische Beeinflussungen in ihrer Funktion erheblich beeinträchtigt werden. Unterhalb der physikalisch bedingten Ausfallschwellen der Hardwarekomponenten treten dabei schon Störungen der Datenübertragung zwischen den Systemen auf. Zur Untersuchung dieser Effekte versagen jedoch etablierte Methoden zur Analyse von Systemempfindlichkeiten, da ein komplexes Zusammenspiel von Störeinwirkungen auf physikalischer Ebene und Reaktionen der Software auf höheren Schichten stattfindet. Um dieses Phänomen systematisch zu untersuchen, werden ein generisches Testnetzwerk und eine neue Testmethode entwickelt. Diese Testumgebung ermöglicht es, physikalische und Software-bedingte Störungseffekte zu trennen und Datenübertragungen quantitativ zu betrachten. Nach einer Validierung der Methode werden typische elektromagnetische Störeinwirkungen mit hoher Leistung im Testnetzwerk systematisch analysiert und mathematisch beschrieben. Hierbei zeigt sich, dass vor allem hoch repetierende Störungen einen besonders starken Einfluss haben. Auf physikalischer Ebene besteht vor allem eine direkte Abhängigkeit zwischen Störeinwirkung und gestörten Daten. Bekannte Phänomene wie eine starke Verlangsamung eines Datentransfers bei Beaufschlagung von Netzwerkkabeln lassen sich vor allem auf die Reaktionen der Software zurückführen und stehen nur mittelbar mit der physikalischen Störeinwirkungen in Zusammenhang. In dem Fall, dass Computer beaufschlagt werden, lässt sich ebenfalls eine Verlangsamung oder Unterbrechung von Datenübertragungen beobachten. Hierbei findet jedoch keine direkte Beeinflussung der Daten statt, sondern das System-Verhalten der Computer ist ausschlaggebend für die Effekte. Aus den experimentell ermittelten Ergebnissen lässt sich folgern, dass die Integrität der elektrischen Signalübertragung in typischen Störumgebungen nicht der bestimmende Faktor für die Kritikalität ist. Datenfehler werden durch die eingesetzten Integritätsprüfungen auf den höheren Kommunikationsschichten zwar zuverlässig erkannt, führen jedoch bei typischen Netzwerkanwendungen zu massiven Geschwindigkeitseinbußen. Mögliche Einflüsse lassen sich in diesem Fall durch den Einsatz geschirmter Kabel minimieren. Aus den Erkenntnissen ergibt sich eine neue Klassifizierung von Effekten als Grundlage für einen methodischen Ansatz zur Bewertung der Systemempfindlichkeit von komplexen, vernetzten Systemen. Je nach Einsatzgebiet lassen sich physikalische oder logische Härtungsmaßnahmen ableiten. Die eingesetzte neue Testmethode erlaubt außerdem eine Erkennung von repetitiven Störungen mittels Zeitreihenanalyse. Somit kann das zugrunde liegende Prinzip zur Software-basierten Detektion von vorsätzlichen, kritischen Störungsbeeinflussungen eingesetzt werden.

Bitfehler, Computer, Datenübertragung, Ethernet, High-Power Electromagnetics, Störempfindlichkeit

Abstract

Networked computer systems can be significantly impaired in their function by intentional electromagnetic interference. Disturbances in the data transmission between the systems can already be observed below the physical failure thresholds of the hardware components. However, established methods for the analysis of system sensitivity are not feasable as interferences on the physical level and reactions of the software on higher layers interact in a complex manner. To systematically investigate this phenomenon, a generic test network and new test method are developed. This test environment enables for separating physical and software-related interference effects, so that quantitative analyzes of data transmissions are possible. Following to a validation of the new method, the test network is used to systematically analyze the influence of typical high-power electromagnetic interferences on computer networks and to develop a mathematical description of the effects. It is found that especially highly repetitive disturbances have a particularly strong influence. On the physical level, there is a direct dependency between interference and disturbed data. The known phenomena such as a significant slowdown of a data transfer when a network cable is exposed to a disturbance can mainly be attributed to the reactions of the software layers. In this case the effects are only related indirectly to the physical interferences. In the case that computers are irradiated by an electromagnetic disturbance, a slowdown or interruption of data transmissions can also be observed. However, no direct influence on the data link takes place, but the systemic behavior of the computer dominates the observable effects. Analyzing the experimental results, it can be concluded that the electrical signal integrity in typical high-power electromagnetic environments is not critical. Data errors are reliably detected by the integrity tests utilized on the higher communication layers, but especially these layers lead to the massive speed drops in typical network applications. In this case possible influences can be minimized by using shielded cables. The findings lead to a new classification of effects as a basis for a methodological approach for assessing the susceptibility of complex networked systems. Depending on the field of application, physical or logical hardening measures can be derived. The newly used test method also allows the recognition of repetitive disturbances by means of time series analysis. Thus, the underlying principle can be used for software-based detection of intentional, critical disturbance influences.

bit error, computer, data transmission, Ethernet, high-power electromagnetics, susceptibility

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**
1.1 Schwerpunktsetzung dieser Arbeit 2
1.1.1 Eingrenzung auf relevante Störbeeinflussungen . . . 3
1.2 Stand der Technik 5
1.2.1 Bisherige Systematik und Ergebnisse 6
1.2.2 Physikalische Effekte 8
1.2.3 Betrachtungen auf Systemebene 9
1.2.4 Störungen auf Netzwerkebene 11
1.3 Offene Problemstellungen und Struktur der Arbeit 12

2 Computer-Netzwerke in Störumgebungen **17**
2.1 Definition von HPEM-Störumgebungen 17
2.1.1 Ultra-Breitbandige Signale (UWB) 19
2.1.2 Gedämpfte Sinuswellen (DS) 20
2.1.3 Hochleistungsmikrowellen 21
2.2 Entwurf eines Referenz-Netzwerks 22
2.2.1 Topologische Anforderungen 22
2.2.2 Realisierung 25
2.2.3 Bestimmung unspezifischer Ausfallschwellen 27
2.3 Klassifizierung bekannter Effekte in Netzwerken 30
2.3.1 Klassifizierung nach Mechanismus 31
2.3.2 Klassifizierung nach Dauer 32
2.3.3 Klassifizierung nach Kritikalität 33
2.4 Notwendigkeit neuer Untersuchungsmethoden 34

3 Entwurf einer neuen Testmethode **35**
3.1 Kommunikation in Computer-Netzwerken 35
3.1.1 Das Schichtenmodell zur Kommunikation mittels Ethernet 36
3.1.2 Einflussmöglichkeiten von HPEM-Störungen 37
3.2 Grundlagen der Informationsübertragung 40
3.2.1 Signaltheoretische Charakteristiken von Ethernet . . 43
3.2.2 Abschätzung von Bitfehlerraten 45
3.2.3 Eingeschränkte Anwendbarkeit auf HPEM-Störungen 47

3.3 Fehlereffekte bei Einbeziehung der Schichten 48
3.3.1 Aufbau eines Ethernet-Pakets 48
3.3.2 Auswirkungen von Bitfehlern auf Ethernet-Rahmen 49
3.3.3 Auswirkungen von Störungen auf IP-Pakete 51
3.3.4 Auswirkungen von Störungen auf den Transport mit TCP 53
3.3.5 Fehlermechanismus bei TCP-basierten Anwendungen 56
3.4 Entwicklung eines UDP-basierten Testverfahrens 57
3.4.1 Anforderungen an das Testverfahren 58
3.4.2 Konzeption des Testverfahrens 59
3.4.3 Prozedur des Testverfahrens 62
3.4.4 Implementierung des Testverfahrens 63
3.4.5 Verarbeitung der Messdaten 66
3.5 Anwendung des neuen Testverfahrens 70

4 Experimentelle Untersuchung des Referenz-Netzwerks 71
4.1 Experimentelles Design 71
4.1.1 Methodische Voraussetzungen 72
4.1.2 Einsatz verschiedener HPEM-Störquellen 72
4.1.3 Systematische Beaufschlagung des Referenz-Netzwerks 74
4.2 Validierung der Testmethode 75
4.2.1 Messaufbau zur Validierung 76
4.2.2 Auswertung der Validierungsmessung 78
4.3 Erzeugung von Bitfehlern 79
4.3.1 Feldeinkopplung mit niedriger bis moderater PRF . 79
4.3.2 Direkte Einspeisung mit niedriger bis hoher PRF . . 83
4.4 Auswertung der Erzeugung von Bitfehlern 86
4.4.1 Auswertung der Feldeinkopplung 86
4.4.2 Auswertung der leitungsgeführten Einspeisung . . . 89
4.4.3 Ergebnisse der Störeinkopplung auf Netzwerkkabel . 89
4.5 Untersuchung des Systemverhaltens 90
4.5.1 Impulsstörungen durch niedrig repetierende HPM-Signale 90
4.5.2 Burst-Störungen durch DS-Signale 94
4.5.3 Quasi-stationäre Störungen durch UWB-Signale . . 97
4.6 Auswertung des Systemverhaltens 99
4.6.1 Auswertung der HPM-Störungen 100
4.6.2 Auswertung der DS-Störungen 100
4.6.3 Auswertung der UWB-Störungen 102
4.6.4 Ergebnisse der Bestrahlung von Gesamtsystemen . . 105

4.7 Untersuchung des Einflusses logischer Schichten 105
4.7.1 Störungen auf der Vermittlungsschicht 106
4.7.2 Störungen auf der Transportschicht 108
4.8 Auswertung der logischen Schichten 109
4.8.1 Einfluss der Vermittlungsschicht 111
4.8.2 Einfluss der Transportschicht 111
4.8.3 Ergebnisse der Untersuchung logischer Schichten . . 114
4.9 Zusammenfassende Betrachtung der Experimente 114

5 Analyse und Modellbildung 117
5.1 Analyse von Störungen auf Leitungsebene 118
5.1.1 Modellierung der Datenübertragungsrate und Paketfehler 119
5.1.2 Analyse des zeitlichen Störungsverhaltens 124
5.2 Analyse von Störungen auf Systemebene 126
5.2.1 Analyse von niedrig repetierenden HPM-Störungen . 127
5.2.2 Analyse von Störungen durch DS-Bursts 128
5.2.3 Beeinflussung durch UWB-Signale 129
5.3 Analyse des Einflusses logischer Schichten 136
5.3.1 Einflüsse der Vermittlungsschicht 136
5.3.2 Einflüsse der Transportschicht 139
5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse 141

6 Anwendungen und Implikationen 145
6.1 Untersuchung von Kabelschirmen 146
6.1.1 Experimentelle Untersuchung von Kabelschirmen . . 146
6.1.2 Ergebnisse zur Untersuchung von Kabelschirmen . . 147
6.2 Bewertung von Leitungsübersprechen 150
6.2.1 Experiment zur Bewertung von Leitungsübersprechen 151
6.2.2 Ergebnis der Bewertung von Leitungsübersprechen . 152
6.3 Detektion von IEMI-Attacken 153
6.3.1 Mathematischer Ansatz zur Detektion 155
6.3.2 Anwendung des Detektionsalgorithmus auf Messdaten 156
6.4 Formulierung einer neuen Klassifizierung 159
6.4.1 Klassifizierung der durchgeführten Experimente . . . 161
6.5 Empfehlungen zur Auslegung von Netzwerken 162

7 Zusammenfassung 165

A Quelltexte **A-169**
A.1 Auszüge aus den Quelltexten von TrafficGen A-169
A.1.1 Header-Datei A-169
A.1.2 Client-Funktionen A-171
A.1.3 Server-Funktionen A-173
A.2 MATLAB-Skripte A-177
A.2.1 Auswertung der Protokolldateien von TrafficGen . . A-177
A.2.2 Berechnung von Datenübertragungsraten A-178
A.2.3 Simulation der Störungen von Datenübertragungen . A-179
A.2.4 Spektrale Auswertung von Datenübertragungsraten . A-181

B Hinweise zur Bedienung von TrafficGen **B-183**

C Messtechnik **C-187**
C.1 Eingesetzte Messmittel C-187
C.2 Anmerkungen zur Messdatenverarbeitung C-188
C.2.1 Behandlung der Messketten C-188
C.2.2 Messungen mit D-Dot-Sensoren C-189

Abbildungsverzeichnis **194**

Tabellenverzeichnis **196**

Quellenverzeichnis **197**

Abkürzungsverzeichnis

ACK	Acknowledgement
AFDX	Avionics Full Duplex Switched Ethernet
AWGR	Additives weißes gaußsches Rauschen
BER	Bit Error Rate
BFR	Breakdown Failure Rate
BSI	Bundesamt für Sicherheit in der Informationstechnik
C^4ISR	Command and Control, Communications, Computers, Intelligence, Surveillance, and Reconnaissance
CCP	Control Channel Packet
CIDR	Classless Inter-Domain Routing
CMRR	Common-Mode Rejection Ratio
CRC	Cyclic Redundancy Check
CW	Continous Wave
DoS	Denial of Service
DFR	Destruction Failure Rate
DS	Damped Sinusoidal
EM	Elektromagnetik/elektromagnetisch
EMC	Electromagnetic Compatibility
EME	Electromagnetic Environment
EMOM	Electromagnetic Office Module
EMP	Electromagnetic Pulse
EMV	Elektromagnetische Verträglichkeit
ESD	Electrostatic Discharge
FCS	Frame Check Sequence
FFT	Fast Fourier Transform
FTP	File Transfer Protocol
GBIC	Gigabit Interface Converter
HPEM	High-Power Electromagnetics
HPM	High-Power Microwaves
ICMP	Internet Control Message Protocol

IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IEMI	Intentional Electromagnetic Interference
IPG	Interpacket Gap
IPv4	Internet-Protokoll Version 4
IRA	Impulse Radiating Antenna
ITU	International Telecommunication Union
LEMP	Lightning Electromagnetic Pulse
LWL	Lichtwellenleiter
MAC	Media Access Control
MTU	Maximum Transfer Unit
NEMP	Nuclear Electromagnetic Pulse
NNEMP	Non-Nuclear Electromagnetic Pulse
OSI	Open Systems Interconnection
PAM	Puls-Amplituden-Modulation
PFR	Perturbation Failure Rate
PRF	Pulse Repetition Frequency
RTR	Retransmission
RFC	Request for Comments
RSTP	Rapid Spanning Tree Protocol
RWIN	Receive Window
SFD	Start Frame Delimiter
STFT	Short-Time Fourier Transform
SNR	Signal-to-Noise Ratio
TEM	Transversal-elektromagnetisch
TCP	Transmission Control Protokoll
UDP	User Datagram Protocol
UTP	Unshielded Twisted Pair
URSI	Union Radio-Scientifique Internationale
USA	Vereinigten Staaten von Amerika
UWB	Ultra-Wide Band
WIS	Wehrwissenschaftliches Institut für Schutztechnologien – ABC-Schutz, Munster
VDE	Verband der Elektrotechnik, Elektronik und Informationstechnik e. V.
VLAN	Virtual Local Area Network
WTD	Wehrtechnische Dienststelle

Formelzeichen

Lateinische Notation

A	Signalamplitude
A_{eq}	Äquivalente Fläche
C	Bitrate
C_{eth}	Nutzdatenrate von Ethernet
$C_{eth,1P}$	Brutto-Datenrate von Ethernet auf einem Aderpaar
C_N	Übertragungskapazität
$C_{N,bin}$	Nyquist-Rate
$C_{N,eth}$	Theoretisch mögliche Ethernet-Datenrate auf einem Aderpaar
C_S	Maximal mögliche fehlerfreie Bitrate
$CMRR$	Common-Mode Rejection Ratio
B	Übertragungsbandbreite
D_{avg}	Durchschnittliche Anzahl gestörter Pakete pro Störeinwirkung
d_{est}	Geschätzte Anzahl an gestörten Datenpaketen
d_{udp}	Ergebnis-Folge für gesendete UDP-Datagramme
E	Elektrische Feldstärke
$E(t)$	Zeitverlauf der elektrischen Feldstärke
E_0	Elektrische Spitzenfeldstärke
E_b	Signalenergie pro Bit
E_{grenz}	Störfeldstärke zum Erreichen der Shannon-Grenze
$\mathcal{F}$	Diskrete Fourier-Transformation
f	Frequenz
$G_M(\omega)$	Übertragungsfunktion einer Messkette
h	Dämpfung eines Übertragungskanals
$h(t)$	Heaviside-Funktion
I_{stoer}	Störstrom auf einem Twisted-Pair-Kabel
K	Differenz der Sequenznummern von zwei Datenpaketen
K_p	Verstärkungsfaktor eines Filters

L	Mögliche Zustände pro Symbol
N	Rauschleistung
N_0	Normierte Rauschleistung
N_{max}	Maximale Rahmenrate
n	Störsignal
P	Größe eines Datenpaketes
P_{udp}	Nutzdaten in einem UDP-Datagramm
P_y	Signalleistung am Empfänger
p_e	Bitfehlerwahrscheinlichkeit
PRF	Impulswiederholfrequenz
p_{multi}	Wahrscheinlichkeit mehrere Datenpakete zu beeinflussen
p_{single}	Wahrscheinlichkeit ein Datenpaket zu beeinflussen
R	Datenübertragungsrate
R_{intp}	Äquidistant interpolierte Datenübertragungsrate
$\hat{R}_{intp,k}$	Spektrogramm einer interpolierten Datenübertragungsrate
$\hat{R}_{PT_1,k}$	Spektrogramm einer Datenübertragungsrate mit Tiefpassfilter
R_n	Datenübertragungsrate bei Zeitschritt n
$R_{n,eth}$	Ethernet-Datenrate bei Zeitschritt n
R_{max}	Erreichbare Datenübertragungsrate bei Störeinwirkung
$\hat{R}_{thresh}$	Schwellwert für Störungsdetektion
S	Nutzsignalleistung
S_n	Sequenznummer
SE	Schirmeffektivität
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SNR_{grenz}	Shannon-Grenze für Gigabit-Ethernet
T	Zeitdauer/Periodendauer
T^*	Gewichtungsfaktor für Tiefpass-Filter
T_{delay}	Verzögerung eines Datenpaketes im Verarbeitungsablauf
T_{Frame}	Zeitlänge eines Rahmens
T_{Impuls}	Zeitlänge eines Störimpulses
T_{PT_1}	Zeitkonstante eines Proportionalgliedes mit Totzeit 1. Ordnung
T_{Symbol}	Zeitlänge eines Symbols
t	Zeit
t_0	Startzeitpunkt
t_{all}	Zeit-Folge für alle ursprünglich gesendeten UDP-Datagramme
t_{eq}	Zeit-Folge mit äquidistanten Schritten
t_{lost}	Zeit-Folge für verlorene UDP-Datagramme

t_{ooo}	Zeit-Folge für außer der Reihe empfangene UDP-Datagramme
t_{recv}	Zeit-Folge für empfangene UDP-Datagramme
U	Elektrische Spannung
$U(t)$	Zeitverlauf der elektrischen Spannung
U_0	Elektrische Spitzenspannung
U_G	Störpegel der Shannon-Grenze
U_{stoer}	Störspannung auf einem Twisted-Pair-Kabel
$u_m(t)$	Messdaten im Zeitbereich
V_r	Abgestrahlte Spannung
$w(t)$	Fensterfunktion
x	Beliebiges Nutzsignal
y	Überlagerung eines gedämpften Nutz- und eines Störsignals
$y(t)$	Messgröße im Zeitbereich
Z_0	Bezugsimpedanz
Z_{TP}	Impedanz eines Twisted-Pair-Kabels

Griechische Notation

α	Rückenparameter eines doppelt-exponentiellen Impulses
β	Stirnparameter eines doppelt-exponentiellen Impulses
Δt	Zeitschritt
ΔV	Spannungsschritt
ε_0	Elektrische Feldkonstante, Permittivität des Vakuums
η	Normierungsfaktor für die Spitzenfeldstärke
λ	Netzwerkauslastung
ω	Kreisfrequenz
σ	Varianz
τ	Startzeitpunkt der Fensterfunktion