

Tijdschrift van het NERG

Correspondentie adres: postbus 39,
2260 AA Leidschendam. Internet:
www.nerg.nl
Gironummer 94746 t.n.v. Penning-
meester NERG, Leidschendam.

DE VERENIGING NERG

Het NERG is een wetenschappelijke
vereniging die zich ten doel stelt de
kennis en het wetenschappelijk
onderzoek op het gebied van de
elektronica, signaalbewerking, com-
municatie- en informatietechnologie
te bevorderen en de verbreiding en
toepassing van die kennis te stimu-
leren.

BESTUUR

prof.dr.ir. W.C. van Etten, voorzitter
prof.dr.ir. A.P.M. Zwamborn,
vice-voorzitter
dr. M.J.C. van den Homberg,
secretaris
ir. A.A. Dogterom, penningmeester
dr.ir. T.J.J. Tjalkens,
programma-manager
G. van der Schouw,
voorzitter onderwijscommissie
dr.ir. A.B. Smolders,
tijdschrift-manager
ir. R.J. Kopmeiners,
web-site beheerder
dr.ir. W.M.C. Dolmans
ing. J.S.A. van Proosdij

LIDMAATSCHAP

Voor het lidmaatschap wende men
zich via het correspondentie-adres
tot de secretaris of via de NERG
website: <http://www.nerg.nl>. Het
lidmaatschap van het NERG staat
open voor hen, die aan een universi-
teit of hogeschool zijn afgestudeerd
en die door hun kennis en ervaring
bij kunnen dragen aan het NERG. De
contributie wordt geheven per
kalenderjaar en is inclusief abonne-
ment op het Tijdschrift van het
NERG en deelname aan vergade-
ringen, lezingen en excursies.

De jaarlijkse contributie bedraagt
voor gewone leden f 95,- en voor
studentleden f 50,-. Bij automatische
incasso wordt f 3,- korting verleend.
Gevorderde studenten aan een uni-
versiteit of hogeschool komen in
aanmerking voor het studentlid-
maatschap. In bepaalde gevallen
kunnen ook andere leden, na overleg
met de penningmeester voor een
gereduceerde contributie in aanmer-
king komen.

HET TIJDSCHRIFT

Het tijdschrift verschijnt vijf maal
per jaar. Opgenomen worden arti-
kelen op het gebied van de elektro-
nica, signaalbewerking, communi-
catie- en informatietechnologie.
Auteurs, die publicatie van hun
onderzoek in het tijdschrift over-
wegen, wordt verzocht vroegtijdig
contact op te nemen met de hoofdred-
acteur of een lid van de Tijdschrift-
commissie.

Toestemming tot overnemen van
artikelen of delen daarvan kan uit-
sluitend worden gegeven door de
redactiecommissie. Alle rechten
worden voorbehouden.

TIJDSCHRIFTCOMMISSIE

dr. ir. A.B. Smolders, voorzitter.
Philips Semiconductors,
DSC-N, Nijmegen,
E-mail: Smolders@ieee.org
ir. H.J. Visser, hoofdredacteur.
TNO-IND, Postbus 6235,
5600 HE Eindhoven,
E-mail: Visser@ieee.org
ir. G.W. Kant, redactielid.
ASTRON Dwingeloo,
E-mail: kant@nfra.nl

Deze uitgave van het NERG
wordt geheel verzorgd door:
Henk Visscher, Zutphen

ISSN 03743853



INHOUD

Van de redactie	2
<i>Huib Visser</i>	
From Point-to-Point Links to Ad-hoc Networks Based on Bluetooth.	3
<i>T. Borst, R. Taori, J. den Hartog, and Jan v.d. Meer</i>	
Ledenmutaties NERG	9
Themabijeenkomst	10
<i>Guido Dolmons</i>	
0-1 Rijen.	11
<i>J.H. van Lint</i>	
Coding with Integers	17
<i>A.J. Han Vinck</i>	
Praktische EMC-ontwerp- aspecten van uitgestrekte systemen	24
<i>P.A. Beeckman</i>	

dr. ir. C.J.M. Verhoeven, redactielid
ITS, TU Delft
Mekelweg 4, 2628 CD Delft

Advertenties: Henk Visscher
tel: (0575) 542380
E-mail: : henk.v@wx.nl

Van de redactie

Huib Visser
hoofdredacteur
visser@ieee.org



Het heeft even geduurd, maar hier is hij dan toch: Het eerste nummer van het Tijdschrift van het NERG, deel 66, jaargang 2001.

De bijzonder aandachtige lezer zal de dynamiek in het colofon van het Tijdschrift het afgelopen jaar zijn opgevallen. Twee van de drie redactieleden zijn recentelijk van werkgever en standplaats veranderd. De hiermee gepaard gaande veranderingen en onvermijdelijke verhuizingen, hebben het redactiewerk voor het Tijdschrift wel eens onder druk gezet. Het valt niet altijd mee om gezeten tussen de potten superdekkende latex - die in de praktijk toch altijd niet zo superdekkend zijn als je je als argeloze consument had voorgesteld - geconcentreerd redactiewerk te doen. Ook veranderingen in de samenwerking met Kluwer hebben bijgedragen tot een latere oplage van dit nummer dan wenselijk werd geacht. Toch zijn we er als redactie (officieel 'tijdschriftcommissie', maar dat woord ligt ons niet zo) in geslaagd de continuïteit - zij het enigszins ten koste van de regel-

maat - te waarborgen. Met trots kunnen we zelfs mededelen dat die continuïteit verder gewaarborgd wordt door de uitbreiding van de redactie met Chris Verhoeven. Chris is werkzaam op de Technische Universiteit Delft binnen de faculteit Informatietechnologie en Systemen (ITS). Door de uitbreiding van de redactie met een vierde redactielid, nu eens niet afkomstig uit het 'old boys microgolfnetwerk' ('no pun intended', zoals de Amerikanen zeggen), hopen wij niet alleen de continuïteit maar ook de kwaliteit van het Tijdschrift zeker te stellen voor de toekomst.

Dit eerste nummer van het Tijdschrift in 2001 staat in het teken van het uitreiken van het erelidmaatschap aan prof. dr. ir. Kees Schouhamer Immink. Van deze gelegenheid, welke als speciale themabijeenkomst plaatsvond op 8 december 2000, wordt verslag gedaan door Guido Dolmans. Verder vindt u in het kader van deze uitreiking bijdragen van twee van de sprekers van die themabijeenkomst;

prof. dr. van Lint ('0-1 rijen') en prof. dr. ir. Vinck ('Coding with integers').

Naast de artikelen in het kader van de uitreiking van het erelidmaatschap, treft u nog artikelen aan over Bluetooth en Electromagnetic Compatibility (EMC).

Voor het tweede nummer van het Tijdschrift kunnen wij u al een bijdrage in het kader van de condensator-impedantie-discussie aankondigen en zal ir. Van der Wurff de aanzet voor een nieuwe discussie geven, of - om het in zijn eigen woorden weer te geven - 'zich op gevaarlijk terrein begeven'.

Namens de redactie van het Tijdschrift van het NERG wens ik u ook dit maal weer veel leesplezier toe.

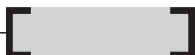


From Point-to-Point Links to Ad-hoc Networks Based on Bluetooth

T. Borst, R. Taori, J. den Hartog, and Jan v.d. Meer

Ericsson EuroLab Netherlands, Ericssonstraat 2; 5121 ML Rijen; The Netherlands.

e-mail: theo.borst@eln.ericsson.se



Abstract

Supported by 9 promoter companies (the Special Interest Group [1]) and over 2000 adopter companies, Bluetooth is envisioned as a key component when it comes to providing short range connectivity and is expected to play a significant role in enabling ubiquitous communications. While products offering point-to-point connectivity using Bluetooth are a reality, Bluetooth units with networking support are still being researched in the laboratories. This paper attempts to enlist the major hurdles that need to be overcome before Bluetooth networking functionality can be adequately deployed.

Introduction

Apart from being the name of a Danish king, Bluetooth is the name given to a wireless communication technology in the unlicensed 2.4 GHz ISM (Industrial-Scientific-Medical) band [2]. Bluetooth is characterised by its low power, low cost, small size and short range connectivity (~10 m). The aim is that any commodity device such as telephones, PDAs, laptops, digital cameras, monitors, printers, etc., should be able to communicate over the radio interface, using Bluetooth [3]. Although the original intention of Bluetooth was to eliminate cables between electronic devices using point-to-point links, today Bluetooth is seen as a promising candidate for ad-hoc wireless networking as well. In this paper, we will attempt to outline the issues that will play a crucial role in the emergence of Bluetooth as a true ad-hoc wireless networking technology.

Bluetooth as a basis for point-to-point links

Driven by the requirement of the ISM Band, which mandates the use of spread spectrum techniques,

as well as the strong drive to keep the radio small, low cost and power efficient, Bluetooth radios deploy frequency hopping (FH) techniques to communicate over the air. Frequency hopping systems divide the entire frequency band into several hop channels as a result of which the transceiver hops from one channel to the other in a pseudo-random fashion. In Bluetooth, a Master/Slave principle is used to regulate the traffic on such a channel. The pattern of the frequency hopping sequence is derived from the Bluetooth address of the Master, and its system clock determines the phase of the frequency hopping pattern. In Bluetooth, a channel is 1 MHz wide and each one of these channels is uniquely characterised by its frequency hopping sequence. Each channel in turn is divided into a number of slots (each with a duration of 0.625 ms), where a different hop frequency is used per slot resulting in a hop rate of 1600 hops/s. Such a fast frequency hopping scheme provides Bluetooth with reasonable immunity against the other *interferers* that are also active in this licence-free band.

In each slot, a packet can be exchanged between two Bluetooth devices that are connected. Before the connection state is reached, however, the Bluetooth units must discover each other. A Bluetooth unit that wishes to set-up a connection will repeatedly, according to well-defined timing and frequency sequences, send *inquiry* messages and listen for *inquiry response* messages. The *inquiry* procedure is followed by the *page* procedure, where the inquirer selects one device, from the many that may have responded, to establish an actual connection. The unit that initiated the connection takes the role of a master and the other unit becomes a slave. It is, however, possible for the roles to be switched at a later time.

Communication takes place either over Synchronous Connection-Oriented (SCO) links or over Asynchronous Connection-Less (ACL) links. The SCO links support symmetrical, circuit-switched point-to-point connections, and are primarily aimed at voice applications. The ACL links, on the other hand, support both symmetric as well as asymmetric traffic, is packet switched in nature and is primarily aimed at data transmission. The voice traffic occupies slots that are assigned *a priori*, thereby guaranteeing a certain quality of service. While, a powerful feature in the provisioning of multimedia services, the reservation of bandwidth, *a priori*, is generally counter-productive to the effective use of the bandwidth.

Bluetooth Ad-hoc Networks

Bluetooth piconets

When two or more Bluetooth units are synchronised to the same frequency hopping channel, a piconet comes into being. Accordingly, even a point-to-point link is, in effect, a special case of a piconet. Figure 1 depicts a Bluetooth piconet.

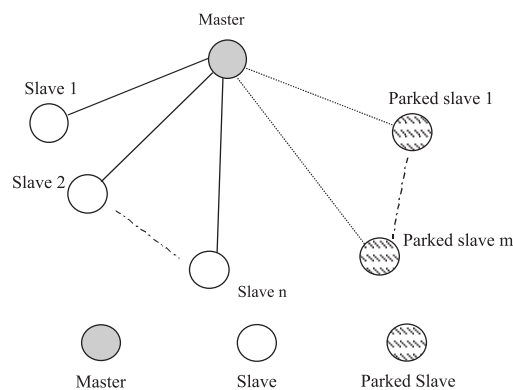
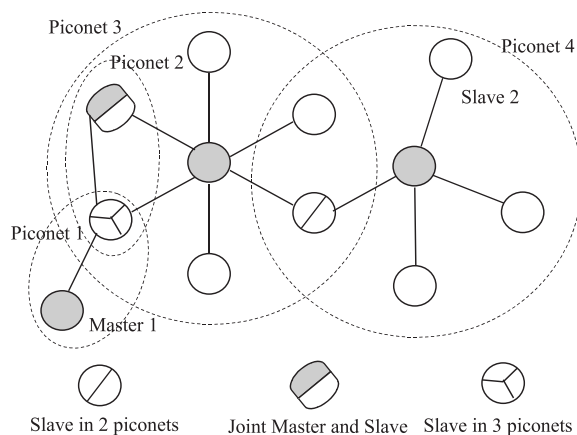


Figure 1. A Bluetooth Piconet showing the Master and its slaves.

Figure 2. A Scatternet formed from overlapping Piconets.



Within a piconet, there may only be one master (and there must always be one) and up to seven active slaves. Any Bluetooth unit may take on the role of a master in a piconet. Although every node in the piconet can hear all traffic on the common radio channel, the logical structure of a piconet is a *star*. In this logical structure, communication takes place exclusively between the master and its slaves, i.e. slaves may only communicate with each other *via* the master. There may be no more than seven active slaves, but an undefined number of inactive slaves. These attach to the master in a power saving mode called the “park mode” and only periodically wake up to listen to the FH channel, and hence are called parked slaves. As the 1 MHz FH-channel is shared between the master and the active slaves, addition of every active slave actually contributes to the reduction of effective bandwidth.

Bluetooth Scatternets

A Scatternet is essentially a group of piconets, with overlapping area of coverage, connected to each other via Bluetooth units that participate in more than one piconet. In contrast to a piconet, where the channel and information are shared, in a scatternet, the radio medium is shared. A schematic representation of a scatternet is presented in Figure 2. Apart from the master and slave nodes, a scatternet also has nodes that are slaves in more than one piconet, or nodes that are master in one piconet and a slave in another. The three basic situations where scatternets can be useful are “bandwidth creation”, range extension, and supporting a network of more than 8 Bluetooth devices.

As individual piconets hop differently, different piconets can simultaneously use different hop channels, i.e. units in one piconet do not share their 1 MHz channel with units in another piconet. Consequently, breaking a larger piconet into multiple piconets, each with a master of its own, can actually raise the aggregate and individual bandwidth of users in a Bluetooth network. Range over which a device can communicate, can be extended by simply adding Bluetooth units acting as bridges. Master 1, in Figure 2, for instance, could not have communicated with Slave 2, in the absence of the scatternet structure.

Connection between units of two different piconets is realised by using time-multiplexing. When a slave leaves one piconet for another, it informs its current master about its absence for a predeter-

mined period of time. Absence of a slave does not effect the communication in the rest of the piconet. Absence of a master on the other hand, (which happens when the master has to fulfill its role as a slave in another piconet), results in the suspension of communication in its own piconet. This process is called inter-piconet communication. Nodes which participate in more than one piconet are often referred to as "bridging nodes" or "forwarding nodes" as they often act as bridges and will be responsible for forwarding traffic from one piconet to the other.

Ad-hoc networks

An ad-hoc network is a network that does not necessitate the presence of a central entity, or user interaction, to come into existence or for maintaining the network. Such a network can spontaneously be formed when two or more Bluetooth devices come into proximity resulting in a stand-alone ad-hoc network, or a wireless extension to a wired or other wireless networks. Nodes may enter or leave the network at any time and communication paths between nodes may vary as the underlying topology varies. Although, not ad-hoc by definition, a Bluetooth scatternet provides a good basis for supporting ad-hoc networking.

Bluetooth and other wireless technologies

Currently, the primary mechanism to interconnect electronic devices is the use of a cable. Infrared (IR) is indeed a possible alternative and has already found home in various appliances including printers, laptops, cameras etc. The major advantages of IR over RF include reduced cost and lower standby power. A significant shortcoming of IR, however, is the line-of-sight requirement, which makes connectivity without user interaction rather difficult to achieve. It is also, in principle, limited to connecting two devices. By contrast, radio signals can propagate around objects and connect to many devices simultaneously. Another wireless initiative, namely the IEEE 802.11 (Wireless LAN) defines both RF as well as IR physical layers. The goal of IEEE 802.11 is enabling LAN-based applications with a larger radio coverage while Bluetooth strives to achieve wireless connectivity between *devices of diverse types* including access point to a LAN. Another difference is the best-effort nature of wireless LAN as compared to best-effort (ACL) as well as guaranteed (SCO) services of Bluetooth. Wireless LAN promises to offer a higher data rate, however. Bluetooth can also be compared to DECT

(Digital Enhanced Cordless Telephony), which also offers capabilities for transporting data. The dissimilarities are that DECT uses a FDD/TDD approach in a *licensed band*, is less power efficient and has a lower throughput for data. Finally, HomeRF which is yet another wireless connectivity initiative by the HomeRF Working Group (HRFWG) focusses on both stand-alone and wireless extensions to home networking technologies. Besides the differences in the type of speech coder and retransmission strategies for voice, one distinguishing factor is that all HomeRF voice traffic is channelled through a control point, while Bluetooth's voice traffic, like its data traffic, uses ad-hoc connections between any two Bluetooth units.

Research Issues in Bluetooth-Based Ad-hoc Networking

Challenges in enabling IP over Bluetooth

Since the Internet Protocol (IP) is widely being expected as *the* global network protocol, many ad-hoc network implementations, including the one based on Bluetooth, could be expected to use IP to achieve global connectivity. In fact, developing functions and mechanisms to enable IP is one of the main targets for current Bluetooth ad-hoc networking research.

An important issue in networking is the neighbour discovery. Usually, neighbour discovery is carried out using a broadcast mechanism. In Bluetooth, this is performed by means of an *inquiry* and the *inquiry response* message. This is followed by the *page* procedure for actually establishing a connection. If the paging unit already had the role of a master in a piconet, then the paged unit has just become another member in its piconet. If not, the paging unit and the paged unit have just established a piconet of their own.

Facts worth noting are that the inquiry procedure, which will be application-driven, may take as long as 10.24s (10ms minimum), paging may take up to 7.6s (0.6 – 1.2s nominal) and the connection procedure may take up to 0.1s. From the foregoing, it is noted that the neighbour discovery may be quite slow, that the connection needs to be established prior to any communication, and that a single transceiver enforces communication on a time-division basis. This has the consequence that apart from careful design of the scheduling algorithms, it might also be necessary to speed up the inquiry

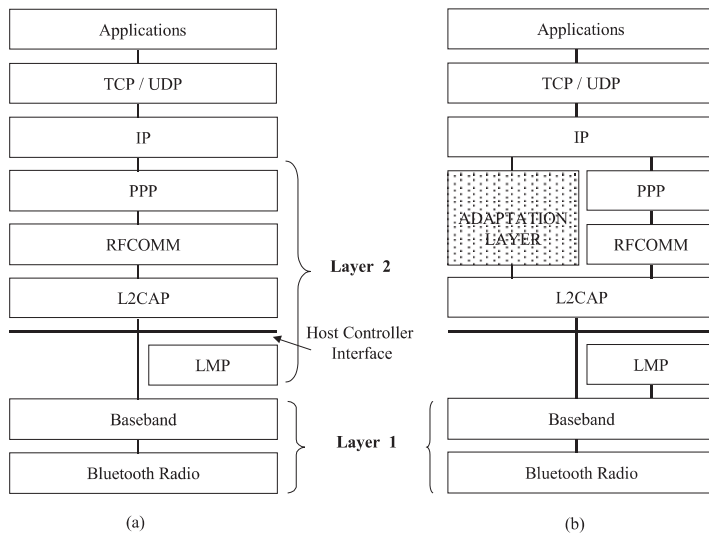


Figure 3. (a) The Bluetooth protocol stack.
(b) Binding IP to Bluetooth, over PPP or via an adaptation layer.

procedures to provide better support for neighbour discovery. Other fundamental issues to consider are where to bind the Internet Protocol (IP) and what is its impact on routing. We begin by looking at the Bluetooth protocol stack, as illustrated in Figure 3(a).

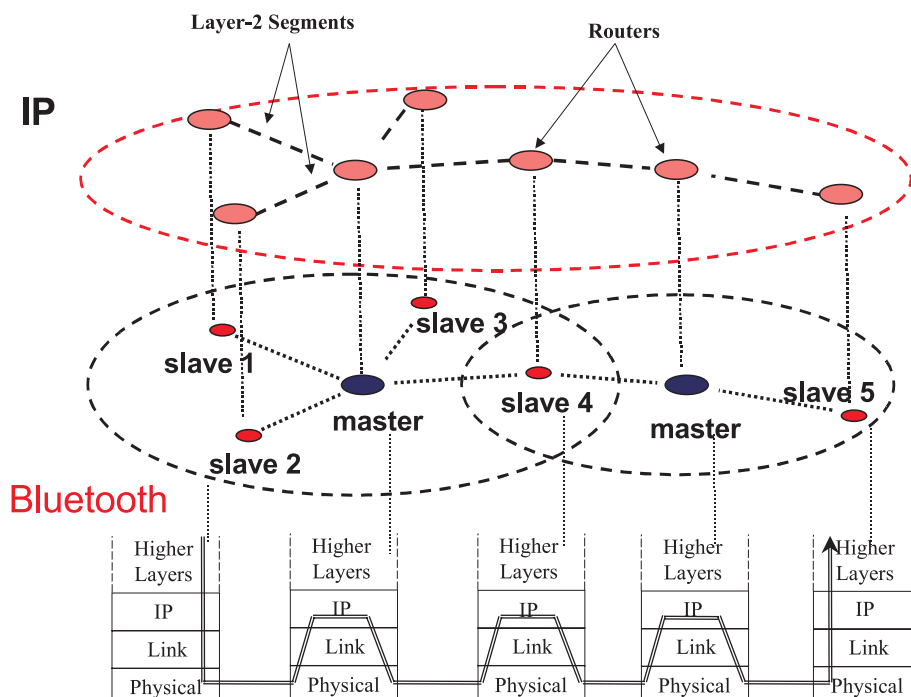
The Baseband protocol defines the timing, framing, packets and flow control of the packets on the link which are sent and received over the physical medium (the Bluetooth radio interface).

The Link Manager protocol (LMP) assumes the responsibility of managing connection states, enforcing fairness among slaves, power management and other management tasks. The Logical Link Control Access Protocol (L2CAP) handles multiplexing of higher level protocols, segmentation and reassembly (SAR) of large packets and service discovery. In Bluetooth, the point-to-point protocol (PPP) runs over RFCOMM which is basically an emulation of the well-known RS232 serial interface. The network layer, shown as IP in Figure 3(a), is currently not specified in the Bluetooth standard. The higher level protocols (represented in the Figure as TCP/UDP) or Applications represent layers in the protocol stack that need not be Bluetooth-specific at all.

IP could either run directly on top of Layer-2 (PPP) or over an adaptation layer on top of L2CAP. Both of these possibilities are indicated in Figure 3(b).

The scenario sketched in Figure 4 illustrates the consequence of binding IP on top of PPP. In this scenario, from the viewpoint of IP and higher layers, Bluetooth is seen as a group of point-to-point links. This has the following consequence for IP routing. Suppose slave 2 wants to transmit an IP packet to slave 5. Every time the packets come across a Bluetooth node with multiple connections, IP routing will be done. This is

Figure 4. Layer-3 Routing solution is obtained by binding IP on top of Layer-2 (PPP).



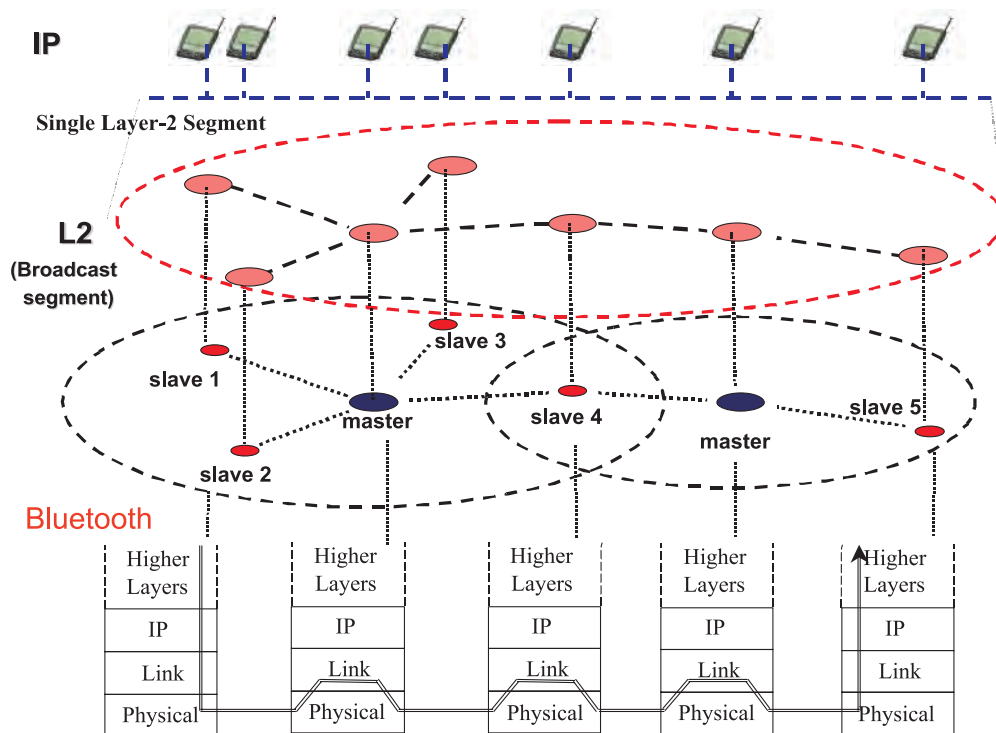


Figure 5: Layer-2 routing: A single Layer-2 segment from IP viewpoint implies no IP routing.

illustrated by tracing the flow of packets across the protocol stack (shown using solid line), under the corresponding nodes. In essence, almost every node (except the *leaf* nodes) has to do IP routing.

The other scenario is sketched in Figure 5. The idea here is to emulate a broadcast segment on top of L2CAP. The purpose of the broadcast layer is to make a Bluetooth scatternet appear as a single Layer-2 segment from the viewpoint of the IP and the higher layers. If, for instance, Ethernet encapsulation is used, it would be a part of this adaptation layer and it would effectively, turn the whole Bluetooth scatternet into a single Ethernet LAN segment. This means that in transporting a packet from slave 2 to slave 5, there is no need for IP-routing and only Layer-2 routing has to be done.

Regardless of where one puts IP, one always has to do the Bluetooth Layer-2 routing. Packets, after all, have to be delivered to a physical device. Building the adaptation layer significantly reduces the work at IP level. The main disadvantage is that Layer-2 routing, generally non-hierarchical, is inefficient compared to the hierarchical IP routing. Choosing the Layer-3 solution means that a lot of the work that has been carried out by the IETF and MANET can be re-used, but it may be inefficient for Blue-

tooth due to the increased overhead introduced by PPP and RFCOMM.

Alongside the choice of Layer-2 or Layer-3 routing, the choice of an appropriate routing protocol itself has to be made as well. Ongoing work has indicated that in the context of ad-hoc routing, reactive protocols have performed better than the proactive protocols [4]. Hybrid protocols, where proactive routing is performed in a limited zone in the vicinity of a node, and reactive routing outside of it, could also be an interesting option for Bluetooth.

Scheduling

Three different scheduling tasks can be identified for the nodes participating in a Bluetooth network. These are the intra-piconet scheduling, the inter-piconet scheduling, and the scheduling of activities that will enable ad-hoc piconet/scatternet forming (network management tasks) which include inquiry, inquiry scan, etc. The extent to which each unit schedules these activities and the ratio of the time devoted to each of these tasks, depends on the level of participation of a unit in the Bluetooth network.

As shown in Figure 2, various device types can be identified in a scatternet. Different types of node pose different levels of complexity. A Master node

must run Intra-piconet scheduling. It has to make sure that all the slaves in the piconet get a fair share of the master's time. The inter-piconet scheduling algorithm must run in the bridging nodes and must communicate with and be synchronised to the intra-piconet scheduling algorithm. A node which is a slave in more than one piconet has to achieve harmonisation with all the master nodes in question, while the master node which is a slave in another piconet has to keep the entire piconet on hold when it is attending the role of slave in the other piconet.

For intra- as well as inter-piconet scheduling, important parameters are the link-type and the number of each type of link. In a SCO link, for instance, the scheduler must schedule regular slots beforehand. This has a direct impact on the available bandwidth, for instance, some of the multi-slot ACL packets have to be rescheduled in order to service the SCO packets. Lack of a good scheduling algorithm would easily result in wastage of bandwidth.

The scheduling of the network management tasks must be coordinated with the intra-piconet scheduling. Here, a trade-off must be made between the known duties within the piconet and the duty of being available for the other devices that seek connection. An inquiring device might have to devote a time period of up to 10.24s to the single task of carrying out an inquiry. This could be unacceptable in a master node as it would have to leave its slaves "on hold" for that period of time. The inquiry scan procedure consumes a period of 10 ms and subsequent scans must be scheduled no further than 2.56s from each other. Time spent on inquiries and scans is positively correlated to the time that it takes for two Bluetooth devices to be connected. Inefficient design of scheduling algorithms would substantially increase connection times resulting in poor ad-hoc networking performance. Some of the ongoing work in this area is detailed in [5].

Other issues:

There are various other important issues that need to be addressed. Think, for instance, of the scatternet forming and reconfiguring algorithms. These algorithms have to provide satisfactory quality of service (QoS) support on of links, with often contradictory requirements, dealing with minimum delay and/or minimum power consumption. Roaming, handover and security are

also important issues that need to be addressed when it comes to providing seamless and secure communications.

Ad-hoc Networking Scenarios: Laptop Conferencing and LAN Access points

Besides the cable replacement scenario, which offers simple, hassle-free connectivity, there are various situations where ad-hoc networks can be formed using Bluetooth devices. Two of these scenarios are discussed below.

A LAN (Local Area Network) access point is envisaged as a device that will actually consist of multiple Bluetooth devices and will act as a bridge between a wired LAN and bluetooth devices that seek LAN access. Multiple Bluetooth devices can connect to each of the LAN access points and gain access to all of the LAN's shared resources.

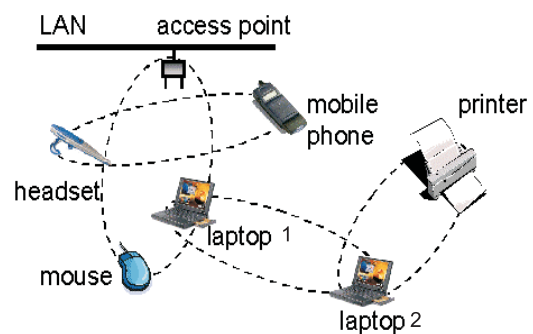


Figure 6: A LAN Access Point Usage Scenario

Such a usage scenario is illustrated in Figure 6, showing a Bluetooth scatternet consisting of 4 piconets. Laptop 2 would in this case be able to access the Bluetooth LAN access point through a link to laptop 1, which acts as a forwarding node between the two piconets. At the same time, the user of laptop 1 can gain access to the printer via Laptop 2 and receive an e-mail via his mobile phone.

In the Laptop conferencing scenario, consider a meeting where a number of participants bring in laptops. It is possible to use Bluetooth to transport document and/or presentation files between the machines. The following usage scenario is envisioned:

- At the start of the meeting the chairman issues a unique conference-id and password;

- the participants provide the id and password to the conference application on their machines;
- the machines check the Bluetooth environment, detect the other participants and perform security checks;
- each machine creates a unique directory e.g. with the name of the conference-id;
- from this point on files stored in this directory, on one machine, will appear on all machines.

Variants where files are passed between individual machines, the presentation runs on the display of all machines or group review of a document are obvious extensions of the basic laptop conferencing scenario. Obviously, one can think of many more usage scenarios.

Conclusions

Bluetooth radio interface fulfills some of the essential qualities to support ad-hoc networking and ubiquitous deployment. These are (a) it is a world-wide standard, (b) it is possible to seamlessly establish connection without the need for any user action, (c) it supports both data and real-time traffic such as speech, and (d) it is low-power, small and inexpensive so as to facilitate easy integration in portable units. On the other hand, Bluetooth is a connection oriented TDD system, with slow neighbour discovery and connection establishment, characteristics which may be

counter-friendly for ad-hoc networking. It has to compete with flexible technologies using broadcast media and random channel access like Wireless LAN (IEEE 802.11). The research challenge is to find networking solutions for Bluetooth while maintaining the three features (small, low-power and inexpensive) that have favourably distinguished Bluetooth from the other wireless technologies.

References

1. The Bluetooth Special Interest Group, <http://www.bluetooth.com/>.
2. J. Haartsen, "Bluetooth: The universal radio interface for ad-hoc, wireless connectivity", *Ericsson Review* No. 3, pp. 110 – 117, 1998.
3. J. Haartsen, et. al, "Bluetooth: Vision, Goals and Architecture", *Mobile Computing and Communications Review*, Vol. 1, No 2, pp.1-9, 1998.
4. P. Johansson, et. al., "Scenario-Based Performance Analysis of Routing Protocols for Mobile Ad-Hoc Networks", *Proceedings Mobicom 1999*, pp. 1414-1420.
5. M. Kalia et. al., MAC Scheduling and SAR policies for Bluetooth: A Master Driven TDD Pico-Cellular Wireless System, *IEEE*, pp. 384 – 388, 1999.



Ledenmutaties NERG



Nieuwe adressen:

Brouwer, ir. J.A.M. de
Amundsenlaan 53
5623 PN EINDHOVEN
Erve, ir.ing. O.M.J. van 't
Noordelijke Esweg 98
7558 MG HENGLO
Meijerink, A.
Oude Wierdenseweg 6a
7604 PC ALMELO

Prasad, prof.dr. R.
Co-director of Center for Personkommunikation
Niels Jernes Vej 12
9220 AALBORG ØST
DENMARK
Smits, ir. P.R.J.M.
Nieuwe Duinweg 17
2587 AA 'S-GRAVENHAGE

Smolders, dr.ir. A.B.
Merseloseweg 5
5825 HB OVERLOON
Visser, ir. H.J.
Asberg 11
5508 DC Veldhoven

Themabijeenkomst

gehouden op 8 december 2000 ter gelegenheid van het uitreiken van het erelidmaatschap aan Prof.dr.ir. Kees Schouhamer Immink.

Guido Dolmons



Tijdens de Algemene Ledenvergadering van het NERG is besloten om prof.dr.ir. Kees Schouhamer Immink tot erelid van het NERG te benoemen. Op suggestie van het aanstaande erelid werd als locatie het Academisch Genootschap in Eindhoven gekozen. Hoewel Kees met zijn recht-door-zee mentaliteit zeker niet de gemakkelijkste was in de omgang met zijn collega's werd deze themabijeenkomst bezocht door een groot aantal ex-collega's en managers uit zijn Philips verleden.

Op het gebied van de optische storage media heeft Kees Schouhamer Immink een groot aantal patenten die bijdragen aan het succes van optische en magnetische producten van Philips.

De eerste spreker ir. Jaap Nijboer, werkzaam bij Philips System Standards and Licensing, schetste de ontwikkeling van het licensen van patenten door 1 persoon in de beginjaren tot het ontstaan van een complete business unit.

Jaap Nijboer haalde een bespreking met Sony aan waar vlak voordat overeenstemming werd bereikt over het CD systeem iemand van Sony opmerkte over het werk van Kees: "Again a mistake of one of your engineers". Dit voorval illustreerde dat het wel eens hard tegen hard ging. Kees had graag een goede tegenstander om tot betere prestaties te kunnen komen.

Prof.dr.ir. Han Vinck, de tweede spreker, verbonden aan de Universiteit Essen, haalde een aantal anekdotes aan, waarbij een gezamenlijk verblijf met Kees in een Japans hotel met bubbelbad een bijzondere vermelding kreeg. Eerder merkte Kees al op in een interview in het NERG tijdschrift [1, 2000] dat het codeer-vak theoretisch lijkt voor buitenstaanders, maar dat in de praktijk veel expe-

rimenteel werk nodig is om het geheel in een industriële omgeving te ontwikkelen. Han Vinck ging ook in zijn presentatie in op theorie versus praktijk in het informatie-theoretische vakgebied, hetgeen hij illustreerde met een aantal praktische voorbeelden zoals gecodeerde modulatie en peak-shift correctie in recording toepassingen.

De derde spreker, Prof.dr. Jack van Lint, "Technische Universiteit Eindhoven" ging in op de eigenschappen van 0-1 rijen. Aangezien Kees nu de 'codeer discussieclub' in het Philips Natlab moet

missen koos Jack van Lint twee toepassingen van de Bruijn rijen die de laatste tijd in de belangstelling van de Philips gemeenschap hadden gestaan: het toepassen van de Bruijn rijen bij de plaatsbepaling van een beweegbaar tafelblad en het toepassen bij verstrooiing van geluidsgolven in concertzalen.

Prof. dr.ir. Peter de With (TUE en CMG) haalde her-

inneringen op uit het HDTV project in het Philips Natlab waar hij een collega was van Kees. Hij sloot af met een voor de decemberperiode toepasselijk sinterklaasgedicht.

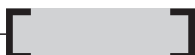
Voor deze gelegenheid is er een nieuw erelidmaatschapspeld ontworpen die tijdens de considerans, uitgesproken door Wim van Etten, werd overhandigd. Kees zette een aantal zaken recht tijdens het uitspreken van zijn dankwoord, hetgeen een onderzoeker die waarde hecht aan zijn principes past. Kees liet meerdere malen weten dat hij van de bijeenkomst erg had genoten. Waarmee nog maar eens onderstreept wordt dat het erelidmaatschap van het NERG een zeer benijdenswaardige onderscheiding is.



0-1 Rijen

J.H. van Lint
Technische Universiteit Eindhoven

Voordracht tijdens het NERG Symposium op 8 december 2000
t.g.v. de toekenning van het erelidmaatschap aan
prof.dr.ir. K.A. Schouhamer Immink.

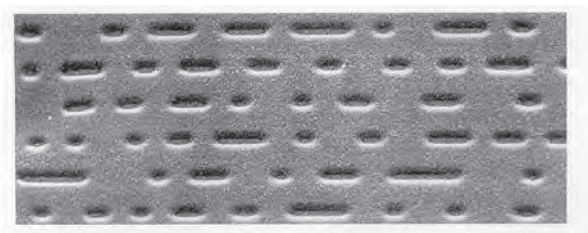


Abstract

In this paper we discuss three topics. First, we consider (d,k) -constrained sequences which are the basis for the idea of Eight to Fourteen Modulation as used in the Compact Disc system. Next, we treat De Bruijn sequences and their application to a practical problem in which a sliding window that moves along the sequence possibly reads one symbol erroneously. In the final section an application of the 2-dimensional analog of a De Bruijn sequence to a problem in acoustics is mentioned.

1 Looplengte begrenzing

Het verband tussen de titel van deze voordracht en de heden te huldigen heer K.A. Schouhamer Immink ziet men in Fig. 1.

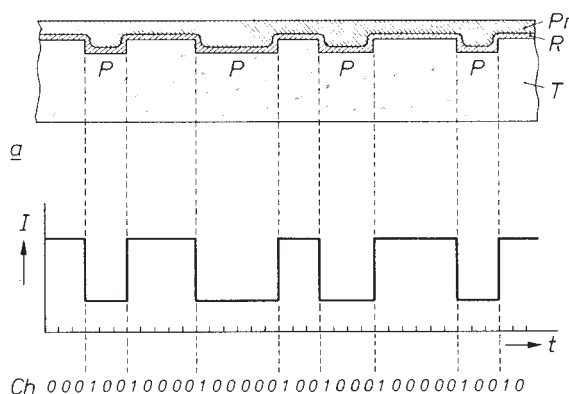


Figuur 1: Stukje oppervlak van een CD, 5000 keer vergroot.

Het spoor op de Compact Disc bestaat uit elkaar afwisselende "putten" en "dammen". Een dwarsdoorsnede van zo'n spoor is weergegeven in Fig. 2.

Bij het aflezen van de plaat via terugkaatsing van een laserstraal wordt het licht dat op een dam valt nagenoeg geheel gereflecteerd, terwijl ten gevolge van interferentie licht dat op een put valt minder wordt gereflecteerd. In de afleesapparatuur wordt een overgang van licht naar donker of omgekeerd geïnterpreteerd als een bit 1. Alle andere bits zijn 0. Het aantal bits tussen twee 1'en hangt af van de lengte van de put of dam en wel één bit per $0,3 \mu\text{m}$.

(Een dam ter lengte $1,2 \mu\text{m}$ wordt dus gelezen als 1000, gevolgd door een 1.)



Figuur 2: Een dwarsdoorsnede van een CD spoor.

Om de CD goed te laten functioneren zijn twee beperkingen opgelegd aan de lengte van putten en dammen. De bitklok moet voortdurend worden gesynchroniseerd m.b.v. het uitgelezen signaal. Daartoe moet voldoende vaak een 1 worden gelezen (overgang put-dam of omgekeerd). Het is dus zaak om de putten en dammen niet te lang te laten zijn. In de terminologie van 0-1 rijen: de maximum looplengte moet zo klein mogelijk zijn. Dit wil zeggen dat nergens meer dan k nullen achter elkaar mogen staan, k nog te kiezen en wel minimaal (ten aanzien van verdere eisen). Men kon met $k = 10$ volstaan.

Bij het uitlezen van de plaat ontstaan problemen als de lichtvlek die op de plaat valt twee opeenvolgende overgangen zou treffen (*intersymbol interferentie*). Dit resulteert in een tweede eis aan de looplengte: tussen twee enen ten minste $d = 2$ nullen. Anders gezegd: putten en dammen zijn ten minste $0,9 \mu\text{m}$ lang. We zijn hiermee aangeland bij het probleem van 0-1 rijen met zogenaamde (d,k) -looplengte beperking.

We kijken nu eerst naar een oud en zeer bekend probleem uit de combinatoriek. Laat F_n het aantal rijtjes van 0'en en 1'en zijn met lengte n en de eigenschap dat nooit twee 1'en naast elkaar staan. Definieer $F_0 = 1$. Men ziet eenvoudig dat $F_1 = 2$, $F_2 = 3$, $F_3 = 5$ (bij $n = 3$ zijn 110, 011, en 111 verboden). Om F_n te bepalen wordt als volgt geredeneerd. Een toegestaan rijtje ter lengte n dat eindigt op een 1 is blijkbaar een toegestaan rijtje ter lengte $n - 2$, gevolgd door 01. Eindigt het rijtje op een 0 dan wordt die 0 voorafgegaan door een willekeurig toegestaan rijtje ter lengte $n - 1$. Daarmee is aangetoond dat

$$F_n = F_{n-1} + F_{n-2}. \quad (1)$$

Hieruit kan men recursief de getallen F_n bepalen. Voor de volledigheid merken we op dat

$$F_n = \frac{1}{\sqrt{5}}(\tau^{n+2} - \bar{\tau}^{n+2}),$$

waarbij $\tau = \frac{1}{2}(1 + \sqrt{5})$ en $\bar{\tau} = -1/\tau$.

Keren we terug naar de CD. Het alfabet voor de gecodeerde gedigitaliseerde muziek bestaat uit de 256 mogelijke *bytes*. Deze moeten vóór het schrijven op de plaat eerst vertaald worden naar 0-1 rijtjes die aan de (d, k) -looplengte beperking voldoen. We noemen de lengte van de rijtjes n . We hebben $d = 2$ en $k = 10$. We noemen het aantal zulke rijtjes a_n en we geven met b_n aan het aantal rijtjes ter lengte n eindigend op een 1. Nu is het weer mogelijk een recurrente betrekking op te stellen voor a_n en b_n . We laten dit als oefening aan de lezer over. Wie het probeert zal vinden dat $a_{13} = 183$ en $a_{14} = 267$. Dit betekent dat bij $n = 14$ voor het eerst het aantal 0-1 rijtjes met de looplengte beperking voldoende groot is, namelijk meer dan 256. Via een woordenboek worden de 256 bytes vertaald naar rijtjes ter lengte 14 (waarbij van de 267 elf lastige rijtjes zijn weggelaten). Dit is de basis van het systeem dat bekend staat als EFM (*eight-to-fourteen modulation*).

Dit is allemaal nog niet zo diepzinnig. Wat ik als de belangrijkste bijdrage van Immink aan het modulatiesysteem beschouw moet nog komen. Een toegestaan rijtje (ter lengte 14) zou op een 1 kunnen eindigen. Een volgend rijtje zou wel eens met een 1 kunnen beginnen en die twee 1'en mogen op de plaat niet naast elkaar staan! Tussen twee veertientallen moeten dus enkele "*koppelbits*" worden geplaatst om aan de (d, k) -looplengte beperking te blijven voldoen. We hebben al opgemerkt dat we van de 267 rijtjes een aantal lastige exemplaren konden weglaten, bijvoorbeeld de twee die met tien 0'en beginnen.

We kunnen met *twee* koppelbits volstaan. Er is (*heel slim*) gekozen om *drie* koppelbits te gebruiken. Dit maakt het eenvoudig om aan de looplengte beperking te voldoen maar geeft nog veel vrijheid in de keuze van de koppelbits. Hoe is die vrijheid gebruikt? De koppelbits zijn zo gekozen dat het vanaf het begin van de plaat geaccumuleerde verschil tussen putlengte en damlengte minimaal blijft. Technisch heeft dit twee voordelige gevolgen.

De laagfrequent-inhoud van het uitleessignaal wordt door deze keuze zo klein mogelijk. Daar de servosystemen voor de spoorvolgning en focusering worden bestuurd met laagfrequent-signalen worden deze zo min mogelijk gestoord door het uitleessignaal.

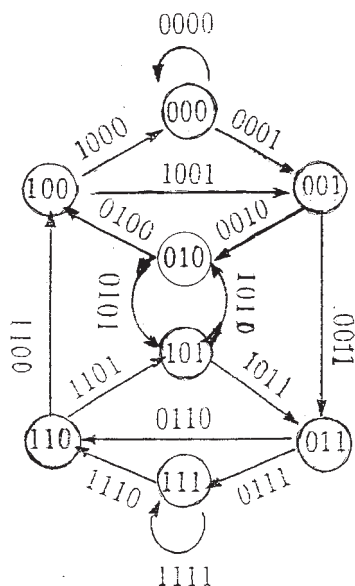
Een tweede voordeel heeft met onze eigen slordigheid te maken. Een vingerafdruk op een CD zou bij het uitlezen de indruk kunnen geven van langdurig slecht teruggekaatst licht. Door de keuze van de koppelbits is bekend dat voortdurend ongeveer de helft van het licht goed moet worden gereflecteerd. De invloed van de vingerafdruk wordt gecompenseerd door met behulp van een filter het beslissingsniveau ("licht" of "donker") aan te passen en zo'n filter kan nu juist gebruikt worden omdat het informatiesignaal géén laagfrequente inhoud heeft!

Al met al een staaltje van het werken met 0-1 rijen om een technisch hoogstandje te realiseren. (Voor meer details, zie [3].)

2 De Bruijn rijen

Daar het middelpunt van deze middag het al enige tijd moet stellen zonder de uiterst stimulerende omgeving van het Natuurkundig Laboratorium van Philips wil ik als volgend onderwerp een probleem kiezen dat de laatste tijd tot twee maal toe maar in heel verschillende gedaantes in onze "Coding Club" opdook. Daartoe eerst terug in de geschiedenis. In Fig. 3 zien we een zogenaamde "*De Bruijn graaf*" op acht punten, genummerd 0=000 tot en met 7=111.

Vanuit ieder punt lopen twee gerichte kanten en wel vanuit abc naar $bc0$ en naar $bc1$. Langs de kant van abc naar bcd hebben we $abcd$ geschreven. Het is duidelijk dat de graaf zestien kanten heeft en dat bij de daarnaast geschreven viertallen $abcd$ precies alle zestien verschillende mogelijkheden één maal voor komen.



Figuur 3: De Bruijn graaf.

We maken nu, zeg vanuit 000 een wandeling langs de kanten van de graaf, waarbij we elke kant één keer gebruiken en in 000 eindigen. We noteren het begin 000 en daarna steeds het nieuwe bit bepaald door de kant die we volgen. Een voorbeeld is de wandeling

0 → 0 → 1 → 2 → 4 → 1 → 3 → 6 → 5 →
2 → 5 → 3 → 7 → 7 → 6 → 4 → 0.

Aangezien de laatste drie bits de terugkeer naar het beginpunt 000 aangeven zijn die 000. We laten die weg en vinden zo de volgende rij van zestien bits

0000100110101111.

We plaatsen het gevonden rijtje van zestien bits nu langs de rand van een cirkel. Als we een venster, dat vier achtereenvolgende bits kan zien, langs de rand van de cirkel schuiven, dan zal de inhoud steeds verschillend zijn. Dit betekent dat de rij gebruikt kan worden om eenduidig de plaats waar het venster zich bevindt te bepalen.

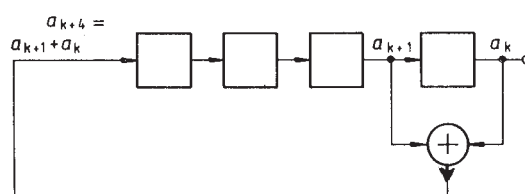
In 1944 werd door K. Posthumus (op het Natuurkundig Laboratorium) in verband met een probleem uit de telecommunicatie de vraag gesteld hoe veel van zulke rijtjes ter lengte 2^n er zijn. (In ons voorbeeld was $n = 4$ en met enig puzzelen kan de lezer wel vaststellen dat er zestien verschillende wandelingen van 000 naar 000 door de graaf van Figuur 3 zijn. Daarbij nemen we z.v.v.a. aan dat het rijtje begint met 0000.) N.G. de Bruijn (toen ook werkzaam op het Nat.Lab.) bewees dat het gevraagde aantal $2^{2^{n-1}-n}$ is (zie [1]). De rijtjes zijn nu bekend onder de naam *De Bruijn rijen* maar in 1975

ontdekte R. Stanley dat het probleem al in 1894 was opgelost door C. Flye-Sainte Marie (zie [2]).

Geruime tijd na het artikel van De Bruijn werd vanuit technische hoek ontdekt dat sommige De Bruijn rijen kunnen worden gegenereerd met behulp van lineaire schuifregisters. De rij die wordt gegenereerd door het schuifregister in Fig. 4 wordt bepaald door de recurrente betrekking

$$a_{k+4} = a_k + a_{k+1}. \quad (2)$$

(We werken met 0 en 1 modulo 2.)



Figuur 4: Schuifregister welke een De Bruijn rij genereert.

Als de begintoestand van het register 0001 is, dan vinden we als output

000100110101111

en dit is ons eerste voorbeeld waaruit één 0 is weggelaten; (als het register toestand 0000 heeft, dan blijft dat zo). Voor de volledigheid merken we op dat het schuifregister een De Bruijn rij oplevert omdat de recurrente betrekking $a_{k+4} = a_{k+1} + a_k$ behoort bij het polynoom $x^4 + x + 1$ en dat is een zogenaamd "primitief polynoom".

Een schuifregister dat is teruggekoppeld met een primitief polynoom doorloopt alle mogelijke toestanden behalve $000 \dots 0$ (vijftien in ons voorbeeld) voordat het weer in de begintoestand komt. Als we met zo'n schuifregister ter lengte n een rij ter lengte $2^n - 1$ genereren dan hoeft slechts een 0 op de goede plaats te worden ingelast om er een De Bruijn rij van te maken.

Onlangs wilde men bij CFT (Centre for manufacturing Technology van Philips) bovenstaande ideeën gebruiken voor nauwkeurige plaatsbepaling van een beweegbaar tafelblad. Er was echter een extra probleem. Door onnauwkeurigheid, krassen of vuil e.d. kon het gebeuren dat bij het uitlezen van een venster een fout werd gemaakt (een 0 gelezen als 1 of andersom). Het toeval wilde dat enkele jaren eerder precies hetzelfde probleem aan de TUE was voorgelegd door PNEU/TEC B.V. in verband met de positionering van een as ([6]). Op

$$M := \begin{pmatrix} 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

Figuur 5: Matrix M

een as moest een lange rij streepjes worden aangebracht die zou worden geïnterpreteerd als een 0–1 rij. Daarbij was een 0 een smalle streep van 0,2 mm gevolgd door een lege ruimte van 0,4 mm terwijl een 1 juist een brede streep gevolgd door een korte lege ruimte zou zijn. De vereiste nauwkeurigheid maakte het nodig een rij van ongeveer 10000 symbolen te gebruiken. Zonder het extra probleem van uitleesfouten zou men dus kunnen volstaan met het nemen van een primitief polynoom van graad 14, het bijbehorende schuifregister een rij ter lengte $2^{14} - 1$ te laten genereren en deze rij op de as te plaatsen. Via een uitleesvenster ter grootte 14 en opzoeken in een tabel was dan de plaats van de as nauwkeurig te bepalen.

De theorie van fouten verbeterende codes bood in dit geval een oplossing voor het probleem van de uitleesfouten. Als we een venster ter lengte $k > 14$ langs de rij schuiven dan zal de inhoud van het venster uiteraard ook steeds verschillend zijn. Maar er geldt meer. Als k voldoende groot is zal de inhoud van het venster op een bepaalde positie op ten minste drie plaatsen verschillen van de inhoud op een andere positie. Dit betekent dat we één uitgelezen bit mogen veranderen zonder dat er twijfel kan ontstaan over de positie van het venster. Immers, er is dan precies één rijtje ter lengte k in onze tabel dat op ten hoogste één plaats verschilt van wat er is uitgelezen. Het bleek (door computeranalyse) dat bij $k = 19$ en bij geschikte keuze van het terugkoppelingspolynoom de genoemde eigenschap voor het eerst optrad. De recurrente betrekking was

$$a_{n+14} = a_{n+13} + a_{n+9} + a_{n+7} + a_{n+6} + a_{n+4} + a_{n+3} + a_{n+2} + a_n. \quad (3)$$

Hoe nu met uitlezen? De recurrente betrekking impliceert dat als we ergens in de rij

$$(x_l, x_{l+1}, \dots, x_{l+14})$$

tegen komen, het inwendig product van deze vector met $(1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 1)$ (weer modulo 2 gerekend) 0 moet zijn.

Kijk nu naar de inhoud van een venster ter lengte 19, zeg $\mathbf{x} = (x_l, x_{l+1}, \dots, x_{l+18})$. Als hier geen

fout in zit dan is het inwendig product met *elke* rij van de matrix M , weergegeven in Fig. 5, gelijk aan 0. We gaan er van uit dat de kans dat bij het uitlezen meer dan één symbool fout wordt gelezen verwaarloosbaar klein is. Neem nu aan dat we $x_{l+5} = 1$ aflezen maar dat dit fout is. Er zou een 0 moeten staan. Berekenen we het inwendig product van \mathbf{x} met de eerste rij van M dan wordt het verkeerde symbool x_{l+5} met 0 vermenigvuldigd. Hierdoor verandert het antwoord niet en we vinden dus weer antwoord 0. Bij de volgende drie rijen gaat het fout. We vinden steeds 1 als antwoord in plaats van 0. Bij de laatste rij komt er weer antwoord 0. De vijf inwendige producten zijn respectievelijk 0,1,1,1,0. Die vijf antwoorden komen op precies één plaats voor als kolom in M en wel de kolom op de plaats waar de fout was afgelezen. We kunnen de fout dus vinden en daarna verbeteren. Ten slotte zoeken we het veertiental waar de verbeterde \mathbf{x} mee begint op in de tabel en de plaats van het venster is bepaald. Oude en recente wiskunde in de praktijk gebracht! Zoals al eerder opgemerkt, dook het zelfde probleem onlangs op in een andere gedaante en het werd dus extra snel opgelost.

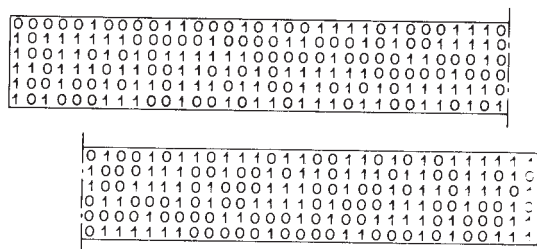
3 Concertzalen

Als laatste onderwerp keren we terug naar de muziek. Een typische wiskundige zal na gelezen te hebben over De Bruijn rijen de neiging hebben zich af te vragen of je het idee kunt generaliseren. Het alfabet veranderen van $\{0, 1\}$ naar een grotere verzameling levert direct succes op. Veel gaat analoog en de stellingen rollen er uit. Nu naar meer dimensies! Vele mogelijkheden dienen zich aan. Kijken we eens naar Fig. 6.

Het kleine vierkantje kunnen we ergens plaatsen en dan horizontaal of vertikaal verschuiven. In beide gevallen kan het vijftien posities innemen, waarbij we aannemen dat als het rechts of beneden uitsteekt, we links of boven “weer binnen komen”. Anders gezegd: we denken ons het grote vierkant geplaatst op een torus (in plaats van de cirkel die we voor De Bruijn rijen gebruikten). En ja hoor: steeds is de inhoud van het kleine vierkantje ver-

[illegible]

Figuur 7 is nog interessanter. Het is een matrix van 6 bij 63. Elke rij is een verkorte De Bruijn rij. Alle 63 kolommen zijn verschillend en niet 0. Bovendien geldt: als we een 2 bij 3 of 3 bij 2 rechthoek horizontaal verschuiven (63 posities, alles weer cyclisch) dan is de inhoud van de rechthoek steeds verschillend (niet zes nullen).



Mijns inziens is de vraagstelling en het vinden van bijbehorende theorie gerechtvaardigd ook als je geen idee hebt waar dit alles goed voor is. Maar de geschiedenis van deze zaak is anders. Toen ik in 1977 op Bell Laboratories werkte stelde de bekende akoestikus M.R. Schroeder mij een vraag. Hij hield zich bezig met de akoestiek van concertzalen. Het schijnt zo te zijn dat moderne concertzalen een te laag plafond hebben vergeleken met de breedte van de zaal. Hierdoor bereiken te weinig *lateraal* bewegende geluidsgolven de luisteraar. Via generalisatie van diffractietheorie (in één dimen-

Om een lang verhaal kort te maken: geef een plek met een plankje aan met het symbool 1 en geen plankje met 0. De grote plank wordt een 0–1 matrix en de eigenschap die Schroeder verlangde om optimale verstrooiing te krijgen was precies waar we deze paragraaf mee zijn begonnen. Als zo’n vraag wordt gesteld aan iemand die de theorie van De Bruijn rijen kent is de generalisatie snel geboren. Zo is het gegaan (zie [4], [5]).

Deze combinatie van muziek, wiskunde en technologie leek mij een passende bijdrage aan deze middag ter ere van mijn vriend en collega Kees Immink.

- [1] N.G. de Bruijn, A combinatorial problem, Proc. Kon. Ned. Akademie v. Wetenschappen **49**, 758–764, 1946.
- [2] N.G. de Bruijn, Acknowledgement of priority to C. Flye Sainte-Marie on the counting of circular arrangements of 2^n zeros and ones that show each n -letter word exactly once, T.H. -Report 75-WSK-06, T.H. Eindhoven 1975.
- [3] J.P.J. Heemskerk en K.A. Schouhamer Immink, ‘Compact Disc’—systeemaspecten en modulatie, Philips Technisch Tijdschrift **40**, 274–281, 1981/82, no. 9.
- [4] J.H. van Lint, F.J. MacWilliams, and N.J.A. Sloane, On Pseudo-random arrays, SIAM J. Appl. Math. **36**, 62–72, 1979.

[5] M.R. Schroeder, Toward Better Concert Hall Acoustics, §26.6 in *Number Theory in Science and Communication*, Springer Verlag, Berlin 1984.

[6] H.C.A. van Tilborg, S.W. Rienstra, en F.C. Bussemaker, Code voor positionering van een as, Rapport IWDE 94-02, Technische Universiteit Eindhoven 1994.

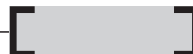
CV

Jacobus Hendricus van Lint werd geboren in Bandoeng (voormalig Nederlands Indië) op 1 september 1932. In 1955 studeerde hij af (cum laude) in de wiskunde en natuurkunde aan de Universiteit van Utrecht. In 1957 promoveerde hij (cum laude) aan deze universiteit. Van Lint was onder andere van 1959 tot 1997 professor in de wiskunde aan de Technische Universiteit Eindhoven. In 1966, 1971 en 1977 was hij lid van de Bell Laboratories te Murray Hill, New Jersey, USA. In 1970 en 1971 was hij Morgan Ward visiting professor aan het Californian Institute of Technology te Pasadena, California, USA. Van 1972 tot 1982 was van Lint part time consultant voor het Mathematical Center Amsterdam en van 1982 tot 1983 Fairchild Distinguished Scholar aan het California Institute of Technology te Pasadena, California, USA. Van 1985 tot heden is hij part time consultant voor Philips Research Laboratories te Eindhoven. Van 1988 tot 1989 was hij visiting professor aan het California Institute of Technology.

Professor van Lint was van 1989 tot 1991 decaan van de faculteit Wiskunde en Informatica van de Technische Universiteit Eindhoven en van 1991 tot 1996 was hij Rector Magnificus van deze universiteit.

Van 1997 tot 1999 was van Lint directeur van het Stan Ackermans Instituut van de Technische Universiteit Eindhoven. In 1999 ging professor van Lint met emeritaat. In 2000 was hij Moore Distinguished Scholar aan het Californian Institute of Technology.

Professor van Lint is onder andere gekozen lid van de Koninklijke Nederlandse Academie van Wetenschappen, ridder in de orde van de Nederlandse leeuw en in het bezit van de Euler Medal van het Institute of Combinatorics and Applications (Canada). Van Lint heeft ereprofessoraten en doctoraten van universiteiten in Roemenië, Noorwegen China en België. Hij is (mede) auteur van 12 boeken en heeft meer dan 150 papers gepubliceerd. Hij is redacteur geweest van vele nationale en internationale wiskundige vaktijdschriften en heeft zitting genomen in diverse internationale committee's.



Stelling

"De elektronische snelweg, c.q. het Internet, wordt de belangrijkste economische infrastructuur van de 21-ste eeuw. Toch zijn de huidige investeringen van de Nederlandse regering in het Internet grofweg duizend maal kleiner dan de investeringen in het Asfaltnet"

proefschrift van B. Stavrov, EFFICIENT BROADBAND PERFORMANCE
ANALYSIS AND DESIGN OF ATM NETWORKS,
Delft, 11 oktober 1999

Coding with Integers

A.J. Han Vinck

University of Essen, Institute for Experimental Mathematics
Ellernstr. 29, 45326, Essen, Germany



At the occasion of the honorary membership of the NERG of dr. Kees Schouhamer Immink

Abstract

Non-binary messages can be converted into binary words using classical enumeration techniques. Transmission errors then occur in the binary world and error-correcting/detecting techniques can be used to reconstruct the original messages. However, sometimes it is more convenient or natural to represent, or leave, messages as integers. We introduce the concept of Integer Codes (IC) to also enable error correction and detection in this non-binary environment. We give several practical examples such as coded modulation and peak-shift correction in recording.

Keywords: coding; integers; recording; modulation.

Introduction

In coding literature, one mainly deals with binary oriented codes. The reason is that for binary codes mathematics give good solutions in the design of powerful codes. However, in a number of applica-

tions, it is more natural to represent symbols by integers. One may also want to present an information sequence in the form of a run-length limited sequence, where symbols indicate the length of successive binary digits that are equal. For instance, the sequence 000110000111100001111100000 can be represented as 03244455, where the 0 indicates that we start the sequence with a zero. We mention the following examples.

Coded-Modulation

In coded modulation, as for instance in 8-phase modulation, one can represent the symbols in the signal constellation by the integers 0,1,...,7, see Fig. 1a.

Each transmitted symbol corresponds to an integer from the constellation. At the receiver, we first map the received analogue signals back to integers and do the decoding operation. Since the transmitted and received symbols are from the set of integers modulo 8, we also have to do the decoding over the set of integers modulo 8. For example, a *channel error* causing the detection of a 7 instead of a transmitted symbol 0 is an error $e = -1$ modulo 8.

Fig.1a. Constellation for 8-Phase modulation.

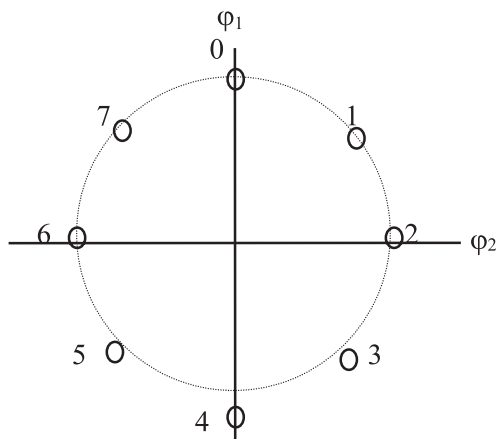
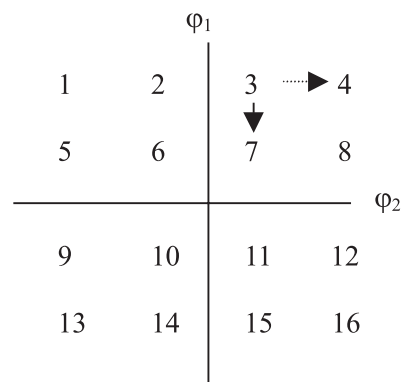


Fig.1b. 16-QAM constellation.



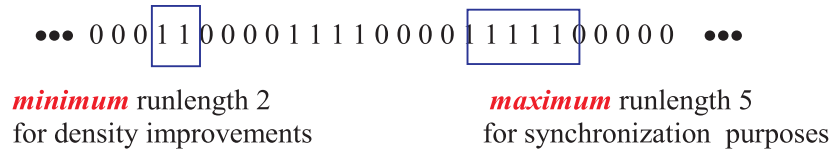


Fig. 2. Example of a sequence with minimum and maximum runlength constraint.

For 16-QAM the situation is such that we have a signal constellation as given in Fig. 1b. The most likely errors have a value $\{+1, -1, +4, -4\}$.

ISBN-Numbering

According to the ISBN numbering, a publisher assigns a 10-digit code word to a book. The last digit of the code word is chosen in a special way such that single errors or double transposition errors can be detected. As an example,

0-19-853804-9

is a valid ISBN number. We explain the encoding and decoding rule in the next chapter.

Recording

Suppose that we store information on a tape. In tape recording, symbols are phrases of runlength limited sequences. For a $(d, k) = (1, 4)$ sequence, phrases have lengths 2, 3, 4, 5, respectively. Another example in optical recording is the CD-(2,10) constrained code.

We first consider unconstrained sequences.

Unconstrained sequences: It takes a length-unit τ to store 1 symbol. The minimum length τ of a unit, or time between two transitions, is specified by the physical conditions of the tape and the detecting

device, see Fig. 3. L information bits can thus be stored on a tape of length $L\tau$ length-units.

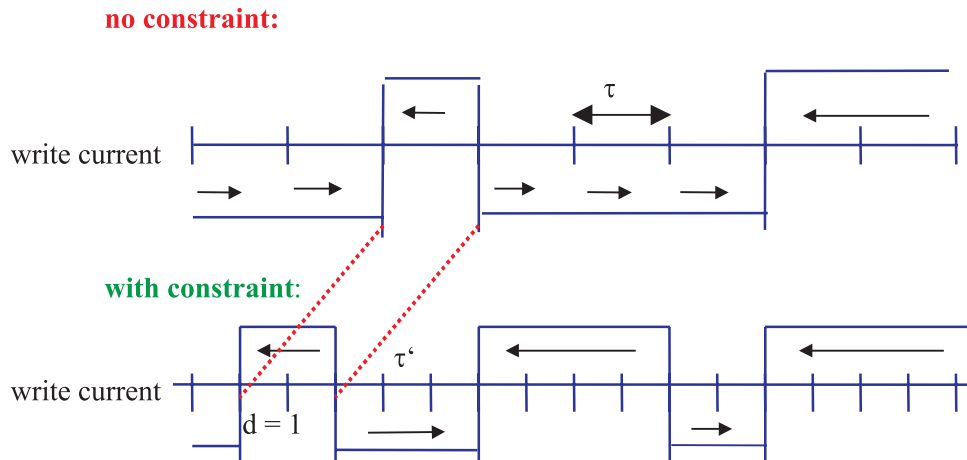
Constrained sequences: Suppose that sequences now have to fulfill a runlength constraint. We have to take the following points into consideration:

1. The binary representation with constraints of L bits of information is longer than in the unconstrained case. For a (d, k) -runlength constrained sequence the increase in representation length is $1/C_{d,k}$, where $C_{d,k}$ is the efficiency of representation. Obviously, $C_{d,k} < 1$.
2. For runlength constrained sequences we introduce a different length unit τ' , where $\tau'(d+1) = \tau$. Thus, the minimum length between two transitions remains unchanged!
3. In [4], the density ratio DR has been defined as $DR = (d+1) C_{d,k}$. As an example, for $d = 4$, $C_{d,k} = 0.4$ and thus $DR = 2$. It has been shown that for large d , the density ratio $DR \rightarrow \log_2 d$.
4. The length to store L bits of information with a constrained sequence is thus

$$L(\text{constrained}) = \tau' \cdot \frac{L}{C_{d,k}} = \frac{\tau}{d+1} \cdot \frac{L}{C_{d,k}} < \tau L$$

for $(d+1) C_{d,k} > 1$

Fig. 3. Storing runlength constrained sequences with a different length window



Example: Suppose that we want to store 2 bits of information with a (1,4) runlength constrained code, where the symbol length specifies the message. The mapping from Table 1 is then performed.

TABLE 1
mapping from unconstrained to (1,4) runlength constrained

Message		represented (modulated as)			
00	→	00	or	11	2
01	→	000	or	111	3
10	→	0000	or	1111	4
11	→	00000	or	11111	5

The average representation length per message for the (d,k)-constrained codes is $2 / 3.5 = 1/1.75$ length-units. With constraint, L bits take on the average

$$L(\text{constrained}) = \tau' \frac{L}{C_{d,k}} = \frac{\tau}{d+1} \cdot \frac{L}{C_{d,k}} = \frac{\tau}{2} \cdot \frac{L}{1/1.75} = \frac{1.75}{2} \tau L = 0.875 \tau L < \tau L !$$

Hence, increasing d gives an improvement in recording density, without reducing the minimum length between two transitions! However, note that the time unit τ is reduced in length by a factor of (d+1), which makes the detection more difficult. It may lead to a particular type of errors, called Peak-Shift errors. This is illustrated in Fig. 4. The phrases are denoted as a(i), a(i+1), a(i+2), ...

For a single Peak-Shift error for symbol a(i) to the right over t positions

$$a(i) := a(i) + t ,$$

$$a(i+1) := a(i+1) - t .$$

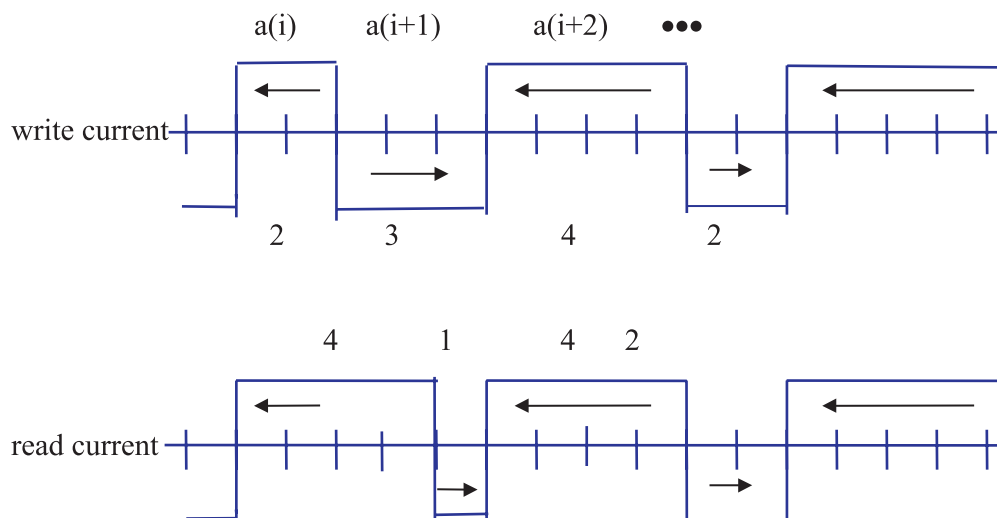
A peak-shift increases a(i) and decreases a(i+1) with a value $\leq t$ for a right shift, or vice versa for a left shift. We will use a special type of Integer Codes to deal with these Peak-Shift errors.

Insertion/Deletion codes

Another original application of integer codes is the correction of insertion and deletion errors. These errors can be caused by imperfect clock regeneration at the receiver. If a sequence is represented by integers, insertions increase a symbol value, whereas deletions decrease the symbol value. We give an example of a class of Integer Codes that corrects a single inversion, or an insertion/deletion error.

In [3], Kabatjanskii, Vinck and Van Wijngaarden give examples of Integer Codes to be used in systems where bit-stuffing errors occur. For synchronization purposes one often uses the marker 011...1. Bit-stuffing is used to avoid the pattern 011...1 in the data stream. It is known that in these systems already single inversion errors may cause undetectable error patterns for any error detection (CRC) code with odd minimum distance. Two channel errors are sufficient to cause undetected errors for even minimum distance codes.

Fig.4. Illustration of a peak-shift error model.



Code constructions

We first introduce some notations:

- the set of integers $Z_m = \{0, 1, \dots, m-1\}$;
- $\underline{a} \in Z_m^N$ is a vector of length N with components from Z_m ;
- $H \in Z_m^{M \times N}$ is a matrix with M rows and N columns and components from Z_m ;
- H^T is the transpose of the matrix H ;
- $\underline{a}H^T$ represents the inner product of the vector \underline{a} with the matrix H^T (calculations modulo m)

The following defines an Integer Code.

Definition 1: Let m, M, N be integers > 0 , $H \in Z_m^{M \times N}$. Then the IC is defined by

$$IC = \{ \underline{a} \in Z_m^N : \underline{a}H^T = \underline{0} \}, \quad (1)$$

where all calculations are done modulo m .

Example: $M = 2, N = 4, m = 3$. For the vector $\underline{a} = (1, 0, 1, 2)$, $\underline{a}H^T = \underline{0}$, where

$$H \in Z_3^{2 \times 4} = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 1 & 2 \end{pmatrix}; \quad \underline{a}H^T = \begin{pmatrix} 1, 0, 1, 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \\ 1 & 1 \\ 1 & 2 \end{pmatrix} = \underline{0}$$

Note that we can construct 9 of these vectors \underline{a} .

Channel errors are additive and have integer values in the set $e \in \{-t, -t+1, \dots, t-1, t\}$. When we transmit a symbol c , we assume that we receive $r = (c + e)$. We furthermore assume that $t < m/2$.

Definition 2: Let C be an IC with check matrix H . Then the syndrome $\underline{S} \in Z_m^M$ of a received word \underline{r} is defined by

$$\underline{S} = \underline{r}H^T = (\underline{a} + \underline{e})H^T = \underline{e}H^T, \quad (2)$$

where all calculations are done modulo m .

Note that we have a maximum of m^M different syndromes.

Definition 3: An IC is called s -error correcting with size of error t if all error vectors $\underline{e} = (e_1, e_2, \dots, e_N)$ with a maximum of s non-zero components of value $e_i \in \{-t, -t+1, \dots, t-1, t\}$ can be corrected.

To be able to correct the errors from definition 3, all syndromes have to be different. Therefore, the number of syndromes generated by the different error patterns should be less than the maximum number of different syndromes m^M , and thus

$$m^M \geq \sum_{i=0}^s \binom{N}{i} (2t)^i. \quad (3)$$

We call an IC perfect when (3) is an equality.

For an IC with $s = 1$ and $t = 1$ the condition (3) is $m^M \geq 2N+1$. For $s = 2$ and $t = 1$ the condition (3) is $m^M \geq 2N^2 + 1$.

Example: For $s = 1, t = 2, M = 2, N = 6$, we can make a perfect code for Z_5 with

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 & 3 & 4 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{pmatrix}.$$

For $s > 1$, the situation is much more difficult than for $s = 1$.

Example: Take $M = 1, N = 3, s = 2$ and $t = 1$. For $H = \{2, 5, 6\}$ the following syndrome table can be constructed for $m = 20$,

TABLE 2
Syndrome values for an IC with $H = \{2, 5, 6\}$, $s = 2, t = 1$ and $m = 20$

error value	+1	-1	(+1,-1)	(-1,+1)	(+1,+1)	(-1,-1)
error positions						
1	2	18				
2	5	15				
3	6	14				
(1,2)			17	3	7	13
(1,3)			16	4	8	12
(2,3)			19	1	11	9

It can be shown that no perfect code for $m = 19$ exists.

Example: Take $M = 1, N = 3, s = 2$ and $t = 3$. The best possible H matrix found by exhaustive computer search is $H = (4, 25, 28)$ for $m = 200$. The lower bound for m is 127.

Example: The optimum code for $s = 2, t = 2, N = 3, M = 2$ is

$$H = \begin{pmatrix} 5 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}.$$

for $m = 13$. The lower bound for m is 8.

Example: The optimum code for $s = 3, t = 1, M = 2, N = 4$ is

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 3 \\ 1 & 2 & 4 & 3 \end{pmatrix}.$$

for $m = 9$. The lower bound for m is 8.

In a practical situation, we have to limit the set of possible input (code) symbols. The channel output space is defined by the modulo m operations. Let the input symbols be restricted to the alphabet $\{0, 1, \dots, m'-1\}$, where $m' < m$. Since 1) there are a maximum of m^M different syndromes 2) $(m')^N$ possible code words and 3) per definition the code words of a code all give the same syndrome value, there must exist a code for which the cardinality (number of code words in a code) is at least $(m')^N / m^M$. The usual definition for code efficiency or rate R gives

$$R \geq \frac{N-M}{M} + \frac{M}{N} \log_{m'} \left(\frac{m'}{m} \right). \quad (4)$$

Note that when $m' = m$, the code rate $R = (N-M)/M$. From (4) it follows that we have to choose m as close to m' as possible, in order to maximize the expected code rate. This topic will be part of the considerations in the code design. We will use the described principles in the following applications.

Application of integer codes

Coded-Modulation. In 8-phase modulation, we may number the transmitted symbols from 0 to 7, see Fig. 1. In an IC of length N , we transmit a series of N signals, where each signal corresponds to an integer from the signal constellation. At the receiver, we first map the received analogue signals back to integers and do the decoding operation. Since the transmitted and received symbols

are from the set of integers modulo 8, we also have to do the decoding over the set of integers modulo 8.

This reduces the set of possible codeword lengths. For instance, using (3), it follows that for $m = 8, t = 3, s = 1$, we need $M = 2$ and $N < 11$. No code for $M = 1$ exists with these parameters. For the standard 8-phase modulation, one uses a mapping from 4 symbols uncoded to 8 symbols coded, or a rate $2/3$ encoding. An $R = 2/3$ code correcting a single error of maximum size 3, is given below. The code is specified by the check matrix

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 3 & 2 & 3 \\ 1 & 0 & 1 & 1 & 3 & 2 \end{pmatrix}.$$

For a codeword $\underline{c} = (c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6)$, where $c_i \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7\}$, the syndrome former outputs $\underline{S} = \underline{c} * H^T = (0, 0)$ modulo 8. Furthermore, note that H defines a systematic encoding procedure. A codeword consists of 4 information symbols and two symbols in the first positions that can be used to satisfy the equations as given by H .

If we use an error vector $\underline{e} = (e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6)$, where $e_i \in \{0, 1, 2, 3, -1, -2, -3\}$, the syndrome former outputs $\underline{S} = (\underline{c} + \underline{e}) * H^T = \underline{e} * H^T$ are different for all single error patterns of maximum size 3, and are thus correctable.

Another code with $s = 1, t = 1$, is defined by $H = (1, 2, 3)$. For this systematic code the rate $R = 2/3$.

TABLE 3
Syndrome former outputs

	error value	1	-1
error position			
1		1	7
2		2	6
3		3	5

Another example is the code of length $N = 3$, specified by

$$H = \begin{pmatrix} 0 & 1 & 2 \\ 1 & 0 & 3 \end{pmatrix}.$$

The $R = 1/3$ systematic code has parameters $s = 1, t = 3; s = 3, t = 1$. Hence, it corrects up to 3 errors of maximum size 1 and 1 error of maximum size 3.

It is easy to determine the minimum Euclidean distance for the above codes and then determine the asymptotic coding gain. Unfortunately, these codes give only a slight improvement of 0.5-0.7 dB

over uncoded 4-PSK. However, in environments where Hamming distance is important, the gain can be more significant. A research topic is the development of good codes and estimation of the performance in a communication environment.

ISBN-numbering codes

For the ISBN code words $(a_1, a_2, \dots, a_{10})$ the encoding rule is such that for the numbers a_1, a_2, \dots, a_{10} , the weighted sum

$$\sum_{i=1}^{10} i \cdot a_i = 0 \text{ modulo } 11,$$

where a_{10} is defined by

$$\sum_{i=1}^9 i \cdot a_i + 10a_{10} = \sum_{i=1}^9 i \cdot a_i - a_{10} = 0 \text{ modulo } 11.$$

We have to use a special symbol X in case $a_{10} = 10$.

A single transmission error gives as a result

$$\sum_{i=1}^{10} i \cdot a_i + j e_j = j e_j \neq 0 \text{ modulo } 11,$$

since 11 is a prime number. It is easy to check that this code can also detect a double transposition error, where two numbers are exchanged.

Recording

The first application can be found in [2], where Levenshtein and Vinck define Peak-Shift correcting codes. A peak-shift error correcting code is defined as

$$C := \{ \underline{a} : \sum_{i=1}^N a_i k_i = 0, \text{ where } a_i \in Z_{m'}, \text{ and } k_i \in Z_m \}. \quad (6)$$

A peak-shift increases a_i and decreases a_{i+1} with a value $\leq t$, or vice versa. A peak-shift at position i of size j gives as a syndrome value

$$S = (+/-) j * (k_i - k_{i+1}) = (+/-) j * h_i \text{ if } i = 1, 2, \dots, N-1$$

$$S = (+/-) j * k_N = (+/-) j * h_N \text{ if } i = N. \quad (7)$$

where h_i is a component from the check matrix H for an IC with $s = 1$, $M = 1$ and maximum error size t . Note that from (7) it immediately follows that

$$k_i = \sum_{j=1}^N h_j, \quad i = 1, 2, \dots, N.$$

We thus constructed a single peak-shift error correcting code, since all syndromes in (7) are different.

We give some simple code constructions. We first recall some of the results from [2], where the main focus was on the construction of perfect codes for $s = 1$.

Theorem 1:

The set of integers $H = \{ 1, 2, \dots, N \}$ is the check matrix for a perfect $s=1, t=1$, IC over Z_m , for $m = 2N+1$.

Proof:

The possible values $+/-h_i = \{ 1, 2, \dots, N, -1, -2, \dots, -N \}$ are different modulo $2N+1$

Theorem 2:

The set of integers $H := \{ 1, 3, \dots, 2N-1 \}$ is the check matrix for a $s = 1, t = 2$, IC over Z_m for $m = 4N + 2$.

Proof:

The possible values $+/-h_i$ and $+/(2h_i)$ are different modulo $4N+2$.

Note that the lower bound is $4N+1$.

Example: Consider $N = 2$. Then $H = \{1, 3\}$ and the values $\{+1, +3, -1, -3\}$ and $\{2, +6, -2, -6\}$ are different modulo $4N+2 = 10$. This code is not perfect since the value 5 is missing.

Insertion/Deletion Codes.

We give an example of a code that corrects a single inversion, or an inversion/deletion error in codewords of length $n \equiv 0 \text{ modulo } 3$.

Theorem 3.

The code C with binary codewords of length $n \equiv 0 \text{ modulo } 3$, for which

$$\begin{aligned} \text{a: } & \sum_{i=1}^n a_i \cdot i \equiv 0 \text{ modulo } (n+1) \\ \text{b: } & \sum_{i=1}^n a_i \equiv 0 \text{ modulo } 3 \end{aligned} \quad (8)$$

corrects a single inversion error or a single insertion/deletion error.

Proof.

The length condition can be used to detect an insertion or deletion error.

A. If no length change occurs, but condition 8a is violated, we detect an inversion error. The condition 8b can be used to distinguish between a $0 \rightarrow 1$ or a $1 \rightarrow 0$ inversion. The first condition then gives the final solution for the position.

B. For an insertion or deletion error, we can use the second condition to solve the value of the insertion or deletion. Again, we use the first condition to solve the position. The method is very similar to the codes described by Varshamov and Tenengolz [1].

Remark.

In general, codes of the above type with cardinality

$$|C| \geq \frac{2^n}{3(n+1)}$$

can be shown to exist.

Example.

Let $n = 6$. The following code,

$C = \{000000, 111111, 001011, 110100\}$ with 4 codewords for which

$$\sum_{i=1}^6 i \cdot a_i = 0 \text{ modulo } 7$$

$$\sum_{i=1}^6 a_i = 0 \text{ modulo } 3$$

corrects a single inversion error or a single deletion/insertion error. The lower bound for the number of codewords is 3.

CV

A.J. Han Vinck is a full professor in Digital Communications at the University of Essen, Essen, Germany, since 1990. He studied electrical engineering at the University of Eindhoven, The Netherlands, where he obtained his Ph.D. in 1980. His interest is in Information and Communication theory, Coding and Network aspects in digital communications.

From 1991-1993 and 1998-2000 he was the director of the Institute for Experimental Mathematics in Essen. Professor Vinck was the director (1997-1999) of the Post-Graduate School on Networking, "CINEMA".

Professor Vinck serves on the Board of Governors of the IEEE Information Theory Society since 1997 (until 2003). In 2000 he was elected 2nd vice president of the IEEE Information Theory Society. In 1999 he was the Program Chairman for the IEEE IT workshop in Kruger Park, South Africa and in 1997 he acted as Co-chairman for the 1997 IEEE Information Theory symposium in Ulm, Germany (704 participants). Professor Vinck was founding Chairman (1995-1998) of the IEEE German Information Theory chapter. In 1990 he organized the IEEE Information Theory workshop in Veldhoven, the Netherlands.

Professor Vinck is the initiator of the Japanese-Benelux workshops on Information theory and the International winter-meeting on Coding, Cryptography and Information theory. He started (Essen, 1997) and still supports the organization of the series of conferences on Power Line Communications and its Applications. He is co-founder and president of the Shannon and the Gauß foundations. These foundations stimulate research and help young scientists in the field of Information theory and Digital Communications.

In 1998 he was elected chairman of the Benelux Information and Communication Theory Society.

Conclusions

We discuss the application of codes over the set of integers modulo m . We give bounds on the code size, code properties, code constructions, computer results and applications. It can be concluded that the concept of IC is interesting in the area where messages are represented by integer numbers as in coded modulation and magnetic recording.

References

- [1] R.R. Varshamov and G.M. Tenengolz, „One asymmetrical error-correcting codes,” (in Russian) *Avtomatika i Telemekhanika*, Vol. 26, no. 2, 1965, pp. 288-292.
- [2] V.I. Levenshtein and A.J. Han Vinck, „Perfect (d,k)-Codes Capable of Correcting Single Peak-shifts,” *IEEE Trans. on Information theory*, Vol. 39, No. 2, March 1993, pp. 656-662.
- [3] G. Kabatjanskii, A.J. Han Vinck, and A.J. van Wijngaarden, „On Combined Synchronization and Error Control Coding,” *IEEE ISIT94*, Trondheim, June 1994, pp. 62.
- [4] K.A.S. Schouhamer Immink, *Codes for Mass Data Storage Systems*, Shannon Foundation publishers, the Netherlands, 1999, ISBN 90-74249-23-X.



Praktische EMC-ontwerpaspecten van uitgestrekte systemen

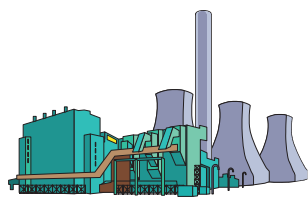
P.A. Beeckman
Philips Research, Eindhoven
pierre.beeckman@philips.com

Abstract:

Tijdens het 13de internationale EMC Symposium in Zürich (feb. '99) is een speciale sessie gehouden over de specifieke EMC-aspecten van uitgestrekte systemen in de praktijk. Dergelijke systemen hebben EMC-aspecten die behoorlijk kunnen verschillen van die van begrensde producten. Voorbeelden van uitgestrekte systemen zijn industriële systemen, medische systemen, transportsystemen en netwerken. Pierre Beeckman heeft als sessievoorzitter een inleidend overzicht gegeven van de praktische aspecten die naar voren komen bij het realiseren en onderhouden van EMC bij dergelijke systemen. Een overzicht van deze aspecten is weer gegeven in dit artikel.*

De praktische EMC ontwerp- en kwalificatieaspecten van uitgestrekte systemen kunnen behoorlijk verschillen, vergeleken met de EMC-aspecten van elektrische of elektronische systemen, subsystemen of componenten van begrensde afmetingen. Uitgestrekte systemen kennen een aantal typische EMC-aspecten:

- De EMC-matrix is groot, dat wil zeggen de complexiteit, het niveau van integratie en de connectiviteit is zodanig dat intra-systeem EMC zeer belangrijk is;
- de afmetingen en de ruimtelijke verdeling, en daarmee ook de verwevenheid met andere systemen is zodanig dat ook inter-systeem EMC van belang is;



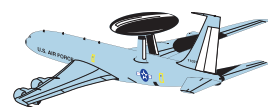
a.



b.



c.



d.

Fig. 1: Enkele voorbeelden van uitgestrekte systemen.

a. Industriële plant b. Medisch afbeeldings- en data verwerkingssysteem c. Een data communicatienetwerk (LAN) d. Een vliegtuig

Inleiding

Uitgestrekte elektrische of elektronische systemen zijn grote en in het algemeen ook complexe systemen om te ontwikkelen. Enkele voorbeelden van dergelijke systemen zijn fabrieken en transportsystemen zoals vliegtuigen, ruimtevaartuigen of treinen. Professionele producten zoals ziekenhuis-systemen, communicatiesystemen of datacommunicatienetwerken kunnen ook worden beschouwd als een uitgestrekt systeem (Fig.1).

- naast de wettelijke EMC-eisen zijn zeker ook de operationele EMC-eisen belangrijk in verband met betrouwbaarheid en veiligheid;
- vele andere systeemeisen beperken de mogelijke oplossingen om EMC te bereiken;
- Uitgestrekte systemen bestaan uit vele verschillende subsystemen en componenten. EMC op systeemniveau is organisatorisch moeilijker te bereiken vanwege de vele

* In het Engels: extended systems. Het begrip 'uitgestrekt' wordt hier gebruikt in de zin van een gedistribueerd, groot en complex systeem met vele eenheden en verbindingen.

verschillende betrokken onderaannemers en leveranciers;

- uitgestrekte systemen worden vaak tegelijkertijd gebruikt en bestuurd door vele verschillende personen;
- delen van de systemen zijn eigendom van verschillende bedrijven of privé-persoonen;
- de levensduur van uitgestrekte systemen is meestal lang vergeleken met de levensduur van kleine en compacte producten als consumentenelektronica; dit betekent dat EMC ook van belang is bij kwaliteitsborging, modificatie, onderhoud, opwaardering en reparatie van een uitgestrekt systeem;
- EMC-kwalificatie, problemen opsporen en het testen van uitgestrekte systemen, meestal op locatie, is vaak gecompliceerd;
- topologische en installatieaspecten zijn in het algemeen van belang om EMC te bereiken;
- toepassing van methodieken voor systeemmanagement, systeemontwikkeling ('systems engineering' en 'concurrent engineering') tijdens de ontwikkeling, installatie en kwalificatie is erg belangrijk;
- vertaling van EMC-eisen en oplossingen op systeemniveau naar subsysteemniveau en omgekeerd is nodig.

Enkele van de specifieke EMC-problemen die zich bij uitgestrekte systemen kunnen voordoen zijn na te lezen in [1].

Voorbeelden van uitgestrekte systemen en hun EMC-eigenschappen

Bij EMC wordt vaak gedacht aan elektronische of elektrische producten die relatief begrensd zijn. Voorbeelden hiervan zijn koffiezetapparaat, CD-spelers en een PC-systeem. Er zijn echter nogal wat producten die veel groter zijn. Bijvoorbeeld een vliegtuig (Fig. 1d) met vele avionica-systemen voor besturing, communicatie, navigatie en veiligheid. Deze deelsystemen met hun vele zend- en ontvangstantennes zijn wat betreft EMC een complex geheel. De energievoorziening en de moderne elektronische voorzieningen voor de passagiers, samen met de vele verbindingen en vele tientallen kilometers kabel introduceren ook verschillende soorten van elektromagnetische bedreigingen en slachtoffers.

Het realiseren en onderhouden van de EMC van een vliegtuig (intra-systeem EMC), maar ook het bereiken van een veilig niveau van immuniteit tegen extern elektromagnetisch onheil (extra-sys-

teem EMC) zoals bliksem en HIRF (High Intensity Radiating Fields), vereisen voor EMC rigoureuze en uitgebreide inspanningen voor ontwikkeling en certificatie. Voor zo'n complex systeem is EMC gedreven door veiligheid en betrouwbaarheid. Fouttolerantie van elektronische systemen geldt ook voor het EMC-ontwerp. Dit kan resulteren in wezenlijk verschillende implementaties van hard- en software voor redundante systemen.

Een ander voorbeeld van een uitgestrekt systeem is een medisch systeem zoals een computer tomografie-systeem (Fig.1b). Delen van dit systeem zoals de scanner, de transformator, besturingspanelen, computers, de deelsystemen voor besturing, opslag en weergave van gegevens, zijn verdeeld over diverse ruimten in een ziekenhuisomgeving. EMC wordt nu gedreven door veiligheid en betrouwbaarheid voor de patiënt en het personeel. Ook hier vereist intra-systeem en inter-systeem EMC een zorgvuldig ontwerp, maar ook site planning en speciale aandacht voor de installatie.

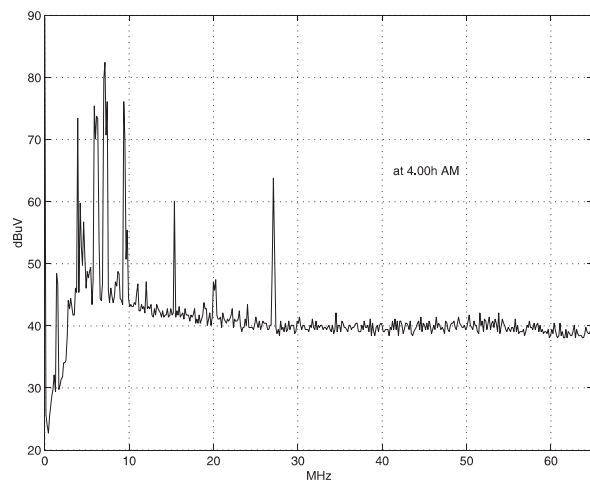


Fig. 2: Vermogensspectrum van de ruis gemeten in het retourkanaal van een bi-directioneel hybride fiber-coax netwerk.

Een laatste voorbeeld van een uitgestrekt systeem is een kabeltelevisie distributienetwerk. Een dergelijk netwerk verdeelt zich over een groot gebied met vele verbindingen en aansluitpunten voor eindgebruikers. Dit heeft tot gevolg dat de stoor signalen van bijvoorbeeld radiozenders, maar ook van transiënten door het schakelen in het huisnet, verdeeld inkoppelen in het netwerk. Fig. 2 geeft het vermogensspectrum van de ingekoppelde ruis zoals die gemeten is in het retourkanaal van een bi-directioneel hybride fiber-coax netwerk [2]. Het eerste deel, tot 25 MHz, is breedband ruis gesuper-

ponere op smalle band stoorsignalen afkomstig van korte golf radiozenders.

Eisen stellen en kwalificeren

Eisen op systeemniveau

De eerste stap in de ontwikkeling van een uitgestrekt systeem is het vaststellen van de eisen op systeemniveau, met inbegrip van de EMC-eisen. We kunnen twee soorten van EMC-eisen onderscheiden: wettelijke en operationele eisen.

In Europa zijn de wettelijke eisen bepaald door EG-richtlijnen. De toepasselijkheid van de Europese EMC Richtlijn 89/336/EEC voor systemen en installaties is nog steeds een onderwerp van discussie en verwarring [3]. Het Guidance Document voor de Europese EMC Richtlijn [4] geeft onder andere voor grote systemen en installaties nadere uitleg over de toepasselijkheid, en over de methoden om overeenstemming met de eisen aan te tonen. In de EMC Richtlijn is het belangrijk te onderscheiden of het systeem is gebouwd voor een specifiek doel, of het ter plekke kan worden geassembleerd, of dat het fysiek kan worden verhandeld ('free physical movement'). Dit bepaalt de eis voor CE-markering, en de noodzaak om te voldoen aan de 'wezenlijke vereisten'. Als een uitgestrekt systeem binnen de scope van de EMC Richtlijn valt, dan is de Technische Constructie Dossier-route vaak de enige mogelijke methode om overeenstemming aan te tonen. Enkele andere productspecifieke Europese Richtlijnen die EMC-aspecten bevatten zijn de Automotive, Medical en RTTE (Radio & Telecommunication Terminal Equipment) Directives. De wettelijke eisen voor vliegtuigen maken deel uit van de luchtwaardigheidseisen en deze zijn ingegeven door veiligheid.

Voor uitgestrekte systemen zijn de operationele eisen zakelijk gezien ook zeer belangrijk. Deze eisen komen vaak voort vanuit contractuele en kwaliteitseisen. De wettelijke en operationele eisen zijn in het algemeen op een kwalitatieve manier opgesteld zoals bijvoorbeeld de wezenlijke vereisten van de EMC Richtlijn. Deze kwalitatieve eisen kunnen kwantitatief worden gemaakt door het afleiden en specificeren van systeem-specifieke eisen, of door het overnemen van normen die voor het systeem geschikt zijn; bijvoorbeeld de IEC-normen (aanbevelingen voor huishoudelijke, industriële, wetenschappelijke, medische en informatietechnologie producten), CENELEC- en ETSI-normen (Europese EMC-normen), MIL-stan-

daarden (militaire producten), SAE-normen (automotive producten), RTCA/EUROCAE-normen (US/Europese avionica-normen).

Voor uitgestrekte systemen is het vaak nodig om de kwantitatieve systeem EMC eisen op maat te maken. Het systeem is uitgestrekt en complex, het bevat vaak vele bedoelde zenders en ontvangers, en het systeem strekt zich uit over EM milieus van verschillende aard en niveaus. Er moet een EMC matrix op systeemniveau worden opgesteld om het EMC probleem op te delen in hanteerbare brokken. Uitgestrekte systemen hebben het kenmerk dat de lijst van bedreigingen en slachtoffers groot en specifiek is. Voor immuniteit bijvoorbeeld is de bescherming tegen directe en indirecte effecten van bliksem vaak een typische EMC kwestie vanwege de uitgestrektheid en de grootte (hoogte) van systemen. Een typische emissiekwestie voor uitgestrekte systemen is het risico voor mensen en explosieve gassen en vloeistoffen ten gevolge van blootstelling aan EM velden. Dit omdat een uitgestrekt systeem ook vaak gewenste radiofrequente zenders met hoge vermogens bevat. Deze twee genoemde aspecten zijn meestal geen kwesties bij gewone begrensde elektronische producten.

Eisen op subsysteemniveau

Vertaling van systeemniveau EMC eisen naar subsysteemniveau- en installatieniveau eisen is een belangrijke kwestie bij de ontwikkeling van uitgestrekte systemen.

Para. 4.3 gaat uitgebreider in op het aspect van het afleiden van deelsysteem EMC eisen. De hoofdaannemer is verantwoordelijk voor de vertaling van systeemniveau EMC eisen voor de specificatie van EMC-deelsysteem en -installatie-eisen richting de onderaannemers. De hoofdaannemer moet bij de onderaannemers ook monitoren of de deelsystemen en installaties voldoen aan de gestelde EMC eisen en hij moet de eventuele afwijkingen beoordelen (deelsysteem acceptatie). Als kant en klare deelsystemen beschikbaar zijn, die echter niet voldoen aan de deelsysteem EMC eisen, dan is een afweging nodig tussen het stellen van extra EMC eisen voor het betreffende deelsysteem of het nemen van extra maatregelen op systeemniveau. Inzicht in alle relevante kostenfactoren en de risico-consequenties is dan van belang.

Kwalificeren

Het demonstreren van overeenstemming met de eisen op systeemniveau, deelsysteemniveau of componentniveau wordt gedaan door kwalitatieve

en kwantitatieve metingen. Kwantitatieve emissie- en immuniteitsmetingen kunnen worden gedaan volgens de normen of door gebruik te maken van specifieke testmethoden en acceptatiecriteria. Vanwege de strenge veiligheidseisen en operationele eisen zijn vaak ook kwalitatieve metingen van het werkelijke uitgestrekte systeem in werking en op de uiteindelijke locatie vereist. Kwalitatieve metingen kunnen worden uitgevoerd door functionele metingen van het systeem in alle mogelijke operationele toestanden. Hierbij moet worden opgemerkt dat de testbaarheid van uitgestrekte en complexe systemen voor wat betreft EMC vaak een probleem in zichzelf is, vanwege het statistisch gedrag van stoorsignalen en vanwege de enorme EMC testmatrix van de deelsystemen. Bovendien veroorzaken de diverse mogelijke systeemconfiguraties en de talrijke operationele modes een probleem bij het uitvoeren van EMC kwalificatiemetingen met een bepaald betrouwbaarheidsniveau.

In de meeste gevallen moeten uitgestrekte systemen vanwege de afmetingen en representativiteit op de operationele locatie (in-situ) worden gekwalificeerd. Dit veroorzaakt specifieke problemen zoals het isoleren van andere systemen en milieus, maar ook de aanpassing van limieten als de meting op de gestandaardiseerde afstand of configuratie niet mogelijk is. Op dit moment bevat alleen CISPR 11 limieten en meetmethoden voor in-situ metingen. Het werk aan de concept norm prEN50217, waarin ook in-situ meetmethoden en limieten werden gedefinieerd werden voor niet-ISM apparaten, is stopgezet.

Normen

Er bestaan vele normen voor producten die beschouwd kunnen worden als uitgestrekte systemen. Voorbeelden van dergelijke normen zijn hieronder (niet uitputtend) weergegeven:

- CISPR 11 (ISM, emissie)
- CISPR 28 (ISM, richtlijnen emissieniveaus)
- CISPR 18 (hoogspanninglijnen en hoge spanningsapparatuur)
- CISPR 12, 21 & 25 (automotive, te vergelijken met SAE-normen)
- CISPR 22 & 24 (ITE, emissie & immuniteit).

Om overeenstemming met de EMC Richtlijn aan te tonen kunnen geharmoniseerde productnormen of generieke normen worden gebruikt. Enkele voorbeelden (niet volledig) van CENELEC product-

normen en generieke normen relevant voor uitgestrekte systemen zijn:

- EN55011 (ISM, emissie)
- EN55022 (ITE, emissie)
- EN55024 (ITE, immuniteit)
- EN50081-1 (generieke emissie, woonomgeving)
- EN50081-2 (generieke emissie, industriële omgeving)
- EN50082-1 (generieke immuniteit, woonomgeving)
- EN50082-2 (generieke immuniteit, industriële omgeving)

De productnormen en generieke normen verwijzen naar de CENELEC basisnormen voor de testdetails. Enkele andere voorbeelden van normen voor uitgestrekte systemen zijn:

- EN50083-serie (kabelsystemen)
- ENV50121-serie (spoorweg toepassingen)
- EN50090-2-2 (elektronische systemen voor huizen en gebouwen)
- FCC 47 Part 18 (ISM)
- EN 60601-serie (medische elektrische apparatuur)

Verder zijn er vele EMC normen ontwikkeld door ETSI voor telecommunicatie- en radiosystemen (ETS 300-serie), die ook soms als uitgestrekte systemen kunnen worden beschouwd. Voor militaire systemen is de systeemniveau specificatie MIL-E-6051D van belang.

Nogmaals, dit overzicht van documenten (normen) die van toepassing kunnen zijn voor uitgestrekte systemen of delen ervan is niet compleet. In de meeste gevallen moeten de systeemniveau EMC eisen door de hoofdaannemer worden aangepast aan de specifieke situatie.

Handboeken

Er bestaan ook verschillende handboeken die de EMC aspecten van grote systemen behandelen. Enkele handboeken die uit verschillende industrietakken voortkomen worden hier als voorbeeld gegeven. Voor militaire systemen wordt het handboek MIL-HDBK-237A gebruikt. Voor de procesindustrie is WIB-rapport M2674X98 van toepassing [5]. Tenslotte is het vermeldenswaardig dat het technische rapport IEC61000-5-2 [6] ook dient als een richtlijn voor installatie en interferentiereductie.

EMC ontwikkelingsaspecten

EMC in de ontwikkelingsfasen

In de levenscyclus van een uitgestrekt systeem kunnen de volgende fasen worden onderscheiden (Fig. 3):

1. Definitiefase (vaststellen van de eisen),
2. Ontwerpfase (specificeren op systeem niveau, deelsysteem niveau en installatie niveau),
3. Productiefase (inclusief deelsysteem productie, assemblage and integratie),
4. Kwalificatie fase (verificatie van de eisen en specificaties),
5. Toepassingsfase (opereren, onderhoud, reparatie en opwaarderen).

Tijdens elke fase moeten de EMC aspecten bekeken worden.

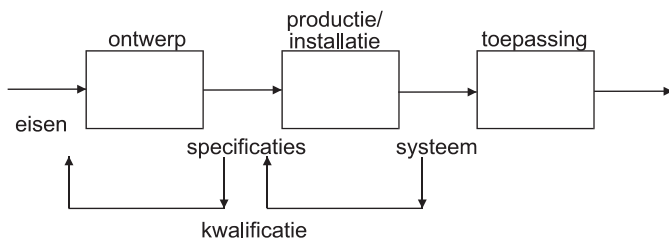


Fig. 3: De ontwikkelingstappen tijdens de productlevenscyclus van een uitgestrekt systeem waarbij EMC aspecten aan bod komen.

Het ontwikkelproces, inclusief de EMC aspecten, van een uitgestrekt systeem, wijkt af van het ontwikkelproces van een begrensd product omdat uitgestrekte systemen gewoonlijk unieke producten zijn (series van een). Overeenstemming met de EMC eisen aantonen wordt daarom vaak op locatie gedaan voor dat ene systeem. Begrensd producten daarentegen worden meestal in grote series gemaakt en de EMC wordt aangetoond door middel van type certificatie met een representatief model of een steekproef en door het toepassen van procedures voor kwaliteitsborging tijdens de serie productie. Voor uitgestrekte systemen wordt EMC ook beschouwd tijdens het toepassen van een systeem. EMC vereist soms een beperking van bepaalde combinaties van toestanden tijdens de werking van het systeem. Denk bijvoorbeeld aan het verbod om elektronische zendapparatuur te gebruiken in bepaalde (kritische) ruimten van een ziekenhuis.

Vergeleken met de levensduur van een begrensd product zoals consumenten elektronica, is de

levensduur van een uitgestrekt systeem in het algemeen lang. Het gevolg is dat bij een uitgestrekt systeem de EMC opnieuw bekeken moet worden na modificatie, onderhoud, opwaardering of reparatie, vooral als er veiligheidskritische deelsystemen mogelijkserwijs aangetast zijn.

Systems-engineering methodieken

Toepassing van 'systems-engineering' methodieken [7] als een gestructureerde manier om complexe en grote systemen te ontwikkelen is erg belangrijk. Dat betekent dat de EMC eisen, samen met andere eisen voor milieu, betrouwbaarheid, onderhoudbaarheid, kosten, productie enz., meegenomen worden als niet-functionele randvoorwaarden. Dit type van niet-functionele randvoorwaarden worden ook wel 'horizontale eisen' of 'specialty requirements' genoemd. Dergelijke horizontale eisen moeten in een ontwikkelingsproces hetzelfde behandeld worden als de functionele eisen. De prioriteit van een eis wordt bepaald door de risico's die gekoppeld zijn aan het niet voldoen van de eis. Aan elke functionele en horizontale eis moet worden voldaan op systeem niveau en deze eisen moeten geïmplementeerd worden in oplossingen.

De verschillende functies van een bepaalde oplossing op systeem niveau moeten ook zorgvuldig vastgelegd worden. Bijvoorbeeld, de vleugel van een vliegtuig is een 'oplossing' voor verschillende eisen. Een vleugel geeft lift, bevat brandstof, heeft besturingsfuncties en draagt vaak de motoren. Echter, de eisen voor ESD en bliksembescherming en de intra-systeem EMC eisen voor elektronische systemen zijn ook deels geïmplementeerd in de vleugel door de juiste keuze van de huiddikte van de vleugel, adequate geleidende verbindingen en kabelroutes. Het wijzigen van de vleugelconstructie en/of materialen ten behoeve van bijvoorbeeld onderhoud-, gewicht- of kosteneisen kan de eerder genoemde EMC oplossingen in de vleugel nadelig beïnvloeden. Een goede beschrijving van de relaties tussen EMC productspecificaties en andere specificaties is nodig. In de systems-engineering methodiek noemt men deze relaties 'interface specificaties'.

EMC bij verschillende product niveaus

Tot nu toe hebben we de EMC eisen en zijn aspecten op systeem niveau besproken. Het is een belangrijke taak om de EMC eisen op systeem niveau om te zetten naar eisen op lagere product

niveaus. Het proces om de EMC eisen en de corresponderende oplossingen te bepalen is in Fig. 4 weergegeven door middel van 'bomen' van eisen en oplossingen. De beide bomen zijn weergegeven door middel van delta-vormen om daarmee het toenemende detail op lagere productniveaus weer te geven. Het is belangrijk om te benadrukken dat de deelsysteem-niveau eisen afhangen van de systeemniveau EMC oplossingen. Bijvoorbeeld, men kan op systeem niveau een integrale afscherming toepassen om te voldoen aan zowel de emissie- als de immuniteitseisen (ofschoon hiermee in het algemeen de intra-systeem EMC eisen niet opgelost worden). Een andere oplossingsmogelijkheid is om EMC maatregelen te nemen alleen voor die systeemonderdelen die een immuniteits- of emissieprobleem hebben. Dit stelt dan bepaalde EMC eisen op deelsysteem of component niveau. Fig. 4 laat zien dat elke EMC eis op een bepaald productniveau geïmplementeerd moet worden in een EMC oplossing. Elke EMC oplossing zal getoetst moeten worden tegen de gestelde eisen. Uit de eisen- en oplossingsbomen van Fig. 4 is ook te zien dat als een EMC ontwerpwijziging (wijziging van de eis of de oplossing) op een hoog productniveau wordt geïntroduceerd, dat dit mogelijk een flink risico met zich meebrengt, omdat het vele detail eisen en oplossingen op lagere productniveaus kan beïnvloeden. Daarom is het in het algemeen beter (vanuit het oogpunt van risico, kosten of onderhoud) om de EMC maatregelen op het laagst mogelijke productniveau te nemen.

Op systeem niveau worden EMC eisen vaak op een kwalitatieve manier gesteld (bijvoorbeeld 'het systeem zal beschermd zijn tegen de indirecte effecten van bliksem'), terwijl op doos of component niveau de eisen vaak op een kwantitatieve manier gesteld worden (bijvoorbeeld 'de transfer impedantie van de kabel moet...').

In tegenstelling tot begrensde producten kan het EM milieu (de lijst van bedreigingen en slachtoffers) buiten een uitgestrekt systeem als functie van de plaats van het systeem variëren. Hetzelfde geldt voor de 'slachtoffers' en 'bedreigingen' binnen het systeem. Als een systeem met verscheidene zender- en ontvangende antennes werkt, dan moeten deze als speciale bedreigingen en slachtoffers behandeld worden (en niet alleen in de zender- en ontvangende banden). Het plaatsen van antennes ten opzichte van elkaar en ten opzichte van het externe EM milieu moet zorgvuldig bekeken worden. Verder is het belangrijk om de diverse andere systeemonderdelen, zoals assem-

blies, sensoren, actuatoren en kabels, te classificeren zowel vanuit het oogpunt van milieu (verschillende klassen van emissie en immuniteitsniveaus) als vanuit het oogpunt van veiligheid. Bijvoorbeeld, veiligheidscritische functies of onderdelen vereisen een grotere EMC veiligheidsmarge. De vertaling van kwantitatieve emissie- en immuniteitseisen tussen de verschillende productniveaus hangt af van het aantal units en interfaces, maar het is ook afhankelijk van het aantal identieke units of interfaces en hun coherentie (coherente emissies en gelijke gevoeligheidseigenschappen).

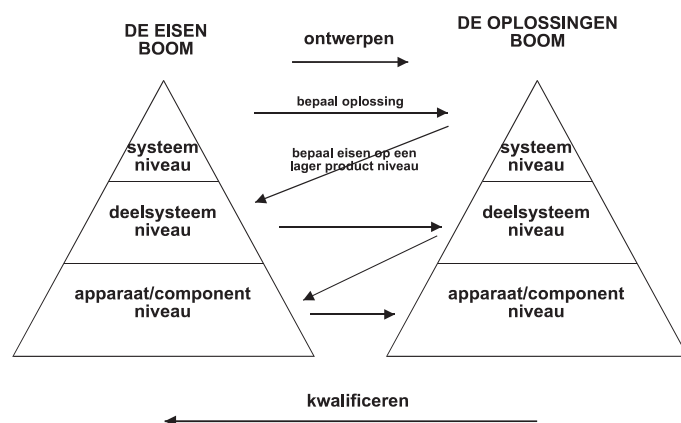


Fig. 4: Productniveaus van een uitgestrekt systeem en de relatie tussen eisen en oplossingen.

Na een eerste allocatie van deelsystemen met hun onderdelen en bekabeling, is het van belang om de inter-systeem en de intra-systeem EMC matrix op te stellen om risico's te identificeren en om specificaties en installatie eisen op deelsysteem niveau af te leiden. Bovendien, om het EMC probleem hanteerbaar te maken is het gemakkelijk om gebruik te maken van topologische zones en van klassen voor units en kabels. Het is duidelijk dat de vertaling van EMC eisen en oplossingen van een bepaald systeemniveau naar lager liggende niveaus enkele ontwerpiteraties nodig maakt wat reallocaties of wijziging van specificaties of zelfs operationele beperkingen kan inhouden. Evaluatie van kosten en risico's zal de uiteindelijke oplossing bepalen. Als voorbeeld kan men [5] raadplegen voor een gedetailleerde en gestructureerde benadering om een groot systeem te ontwerpen voor wat betreft EMC.

EMC documentatie and EMC beheer

Verschillende typen EMC documenten spelen een rol bij de ontwikkeling, operatie en onderhoud van

een typisch uitgestrekt systeem. Dergelijke documenten zijn nodig voor de herleidbaarheid van het ontwerp en ze geven informatie over de EMC aspecten met betrekking tot ontwerp, kwalificatie, beheer, productie, installatie en uitbesteding. Onder andere de volgende typen documenten worden daarvoor gebruikt:

- Project plan,
- Eisen specificatie,
- Systeemniveau ontwerp specificatie,
- Kwalificatie plan,
- Deelsysteem specificaties,
- Kwalificatie documenten,
- Installatie handleidingen,
- Kwaliteitsborging procedures,
- Operatie- & onderhoudshandboeken.

Nogmaals, het is belangrijk dat op elk product niveau van het systeem, de EMC aspecten vastgelegd worden in specificaties en dat overeenstemming met deze eisen gedemonstreerd wordt in kwalificatie rapporten. Tijdens de ontwikkeling, maar ook gedurende de levensduur van het systeem moet configuratiebeheer met betrekking tot EMC nauwgezet uitgevoerd worden. Onderhoud, reparatie of opwaardering van het systeem kan de EMC van het systeem aantasten.

Met moet er in het bijzonder voor zorgen dat wijzigingen in het EM milieu, maar ook dat de ontwerp-wijzigingen die voortkomen uit alle ontwerpdisciplines (ook de niet elektrische/elektronische) goed gecommuniceerd worden en dat de eventuele EMC effecten ervan beoordeeld worden. Goede documentatie en vastlegging van de ontwerpgegevens inclusief de ontwerpgeschiedenis ('rationales') vergemakkelijkt zo'n 'EMC assessment'. De levensduur van uitgestrekte systemen kan vele tientallen jaren beslaan. Goede EMC documentatie en configuratiebewaking is daarom van groot belang, ook om naderhand problemen op te kunnen lossen. Het goed documenteren en communiceren van de EMC aspecten is ook van belang omdat er vele partijen binnen de projectorganisatie, de onderaannemers en leveranciers betrokken zijn bij de ontwikkeling van een typisch uitgestrekt systeem. Verder kunnen tijdens de operatie van een uitgestrekt systeem ook verschillende operators, gebruikers en eigenaren een rol spelen.

Methoden en middelen

Het is duidelijk dat voor de ontwikkeling van uitgestrekte systemen ook specifieke middelen nodig

zijn voor de ontwikkeling of kwalificatie op systeemniveau. Uitgestrekte systemen zijn vaak systemen met grote afmetingen. Daarom zijn simulaties van het totale systeem meestal niet mogelijk. De EMC matrix kan gebruikt worden om te beslissen over de noodzaak om delen van het systeem (EMC matrix elementen met risico's) te simuleren door middel van tests of analyses. De beschikbaarheid van EMC ontwikkeling- en managementmiddelen zoals TDAS-EMC [8], is daarbij handig. Ook vanwege de grote schaal of andere bijzonderheden van een uitgestrekt systeem is de testbaarheid vaak een probleem. Denk bijvoorbeeld aan een ruimteplatform waarvan de configuratie met de tijd langzaam groeit en verandert over een periode van vele jaren. Het meten in de ruimte is niet alleen onmogelijk maar ook te laat. In het algemeen moet een uitgestrekt systeem vanaf het begin van de operatie vrij zijn van EMI problemen vanwege de grote operationele en economische belangen. Dit rechtvaardigt voor uitgestrekte systemen een heleboel investeringen in zowel meet- of softwaresimulatiemiddelen.

Trends, ontwikkelingen en problemen bij netwerken

Deze paragraaf geeft enkele trends in uitgestrekte systemen die relevant zijn voor EMC, met een nadruk op de ontwikkelingen en problemen in netwerken. Er worden vele nieuwe functies en diensten geïntroduceerd of toegevoegd aan al bestaande netwerkinfrastructuren [10]. Bovendien zal elk separaat deel van een netwerk moeten voldoen aan bepaalde (wettelijke) eisen. Als echter zo'n gekwalificeerd deel verbonden wordt met het netwerk en geplaatst wordt in een gebouw met andere uitgestrekte systemen of draadloze communicatiesystemen, dan kan het zijn dat het totale netwerk niet aan de operationele EMC eisen voldoet. Het is dus van belang om de EMC gevolgen van bestaande of nieuwe of gemodificeerde netwerksystemen te voorspellen.

Ten eerste kunnen we opmerken dat begin dit jaar het COST 261 project is gestart, dat gesponsord is door de Europese Commissie. Deze COST actie gaat over de EMC in gedistribueerde en complexe systemen [11]. Het doel van dit Europese project is om het Europese onderzoek op het complexe terrein van EMC van uitgestrekte systemen te coördineren en te faciliteren.

Ten gevolge van de toenemende toepassing van communicatie diensten bij hogere frequenties zal

ook meer aandacht besteed moeten worden aan de EMC van netwerken voor frequenties hoger dan 1 GHz. Met uitzondering van industriële, wetenschappelijke en medische systemen, beperken de meeste EMC eisen en normen zich tot 1 GHz.

Tot nu toe was de weging van transiënte stoorsignalen gedefinieerd door de quasi-piek detector-krommen uit CISPR 16. Deze weging was gebaseerd op de menselijke perceptie van interferentie bij analoge radiosystemen. Het is duidelijk dat de meting van EM stoorsignalen in de toekomst ook gerelateerd moet worden aan de effecten op digitale systemen.

Nieuw geïnstalleerde LANs gebruiken of onafgeschermd of afgeschermd getwiste paren (UTP of STP). Bij de aanhoudende discussie over welk type kabel nu de voorkeur geniet om EMI problemen te voorkomen ontbreekt het aan degelijke EMC-technische argumenten [12], [13]. De omzetting tussen 'common-mode' en 'differential-mode' signalen bij deze kabels moet onderzocht worden voor zowel emissie als immuniteit. De discussie over het gebruik van of UTP of STP is vooral bepaald door installatiekosten. Het gebruik van bestaande telefoonlijnen voor transmissies met hoge 'bit-rates' (met b.v. VDSL of ADSL-technologie) zal ook nader onderzocht moeten worden [14]. CENELEC TC215 draagt bij aan de installatieaspecten van IT-bekabeling door een norm te ontwikkelen waarin eisen en richtlijnen gegeven worden over de EMC aspecten van IT-bekabelingsinstallaties in gebouwen en faciliteiten [15].

Een andere ontwikkeling is dat 'In-Home Digital Networks' (IHDNs) in huis gebruikt zullen worden om allerlei audio, video, communicatie en computer toepassingen binnenshuis met elkaar te koppelen, bijvoorbeeld door gebruik te maken van interfaces die voldoen aan de IEEE-1394 norm. In de toekomst zullen IHDNs de toegang vormen naar publieke netwerken waarbij de netwerkdiensten interactieve multimedia diensten leveren. Ten gevolge van de verregaande ontwikkeling van netwerken en multimedia diensten is men binnen CISPR bezig om hiervoor nieuwe (sub-) comités op te richten. De huidige CISPR productcomités zijn niet voldoende toegerust om ook EMC normen voor multimedia en netwerksysteem producten te ontwikkelen.

Veel kabeldiensten zijn bezig om hun kabeldistributienetwerk op te waarderen naar een bi-directioneel hybride glas-coax netwerk (HFC) waarmee naast video ook spraak en data diensten geleverd kunnen worden. Een volledig glasfiber netwerk

(tot in het huis) zal nog even op zich laten wachten vanwege de hoge investeringen die ermee gemoeid zijn. De emissie en ruisinkoppeling bij de abonnee blijft daarom een zorgwekkend probleem, zeker ook gezien de toename van het aantal draadloze communicatie- of besturingsproducten. Fig. 2 gaf een voorbeeld van het gemeten vermogenspectrum van het retourkanaal van een kabeltelevisiedistributienetwerk. In tegenstelling tot wat men in het algemeen denkt is het niet de CW-ruisinkoppeling maar vooral de inkoppeling van transiënten die de kwaliteit van de netwerkfunctie beperkt.

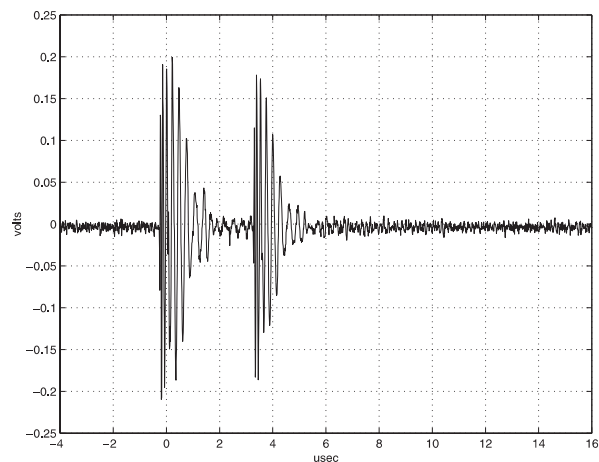


Fig. 5: Transiënten gemeten in het retourkanaal van een bi-directioneel hybride fiber-coax kabeltelevisie netwerk (zie ook Fig .2)

Fig. 5 geeft een voorbeeld van een ingekoppelde transiënt in hetzelfde retourkanaal van het Eindhovense kabeltelevisienetwerk. Deze transiënten zijn redelijk typisch en kunnen simpelweg veroorzaakt worden door het aan- en uitschakelen van een gewone gloeilamp. De amplitude van de transiënt komt overeen met de waarde van spanningszwaai in het retourkanaal. De inkoppeling van de ruis wordt vooral veroorzaakt door ondeugdelijke coaxkabels en connectoraansluitingen in de huizen en minder door inkoppeling in de netwerkinfrastructuur die beheerd wordt door de kabeldiensten. Dit voorbeeld toont aan dat meer statisch onderzoek nodig is om het EM milieu van netwerken te karakteriseren. Voor bepaalde soorten van netwerken worden al standaarden ontwikkeld [16]. Helaas beperkt deze voorlopige standaard zich tot niveaus en methoden voor emissie via straling. Emissie via geleiding beneden de 30 MHz is daarbij niet behandeld.

Referenties

- [1] [IEE Colloquim Digest, 'EMC in large systems', London, feb. 1994.
- [2] [P.J. Snijder, R.M. Hanenberg, 'Some investigations into the return-path performance of the Eindhoven CATV network', Philips Research Technical Note 133/98.
- [3] [T. Maddocks, 'Safety and reliability: key facets for installations', Approval Magazine, jan/feb 1997.
- [4] [EC DG III document, 'Guidelines on the application of council directive 89/336/EEC of 3 May 1989 on the approximation of the laws of the member states relating to EMC', mei 1997.
- [5] [WIB Report M2674X98, 'EMC implementation guideline for process control installations', mei 1998.
- [6] [IEC Technical Report IEC 61000-5-2, 'EMC: Mitigation methods and installation guidelines; Earthing and Cabling', 1997.
- [7] [B.S. Blanchard, W.J. Fabrycky, 'Systems Engineering and Analysis', Prentice-Hall International, ISBN 0-13-880840-6.
- [8] [L. Inzoli, C. Garres, J.P. Granger, J.G. Ferrante, J. Seille, N. Fragnol, M.F. Marino, 'TDAS-EMC: An engineering tool for EMC control of large systems', Proceedings of the 3rd ESA European Workshop on EMC and computational electromagnetics, Pisa, oktober 1993.
- [9] [TDAS-EMC: EMC SYSTEM ENGINEERING FRAMEWORK. DESCRIPTION (TDAS-EMC means Test Data Analysis System for ElectroMagnetic Compatibility); WWW-info: <http://www.dappolonia.it/TECTRANS/computer/Comp26.htm>).
- [10] [A. Dutta-Roy, 'Cable it's not just for TV', IEEE Spectrum, mei 1999, blz. 53.
- [11] [European COST 261 Action: Electromagnetic Compatibility (EMC) in Distributed and Complex Systems (COST site: <http://emc2.ohm.york.ac.uk/cost261/>).
- [12] [T.C. Tan, 'To shield or not to shield, the myths and facts', EFOC & N Conference Proceedings, The Hague, juni 1993.
- [13] [D. Greenfield, 'Wire act leaves LANs dangling', Data Communications on the Web, feb. 1996.
- [14] [M. Ferro, L. Lavezarro, L. Petrini, G. Pierucci, R. Pomponi, V. Squizzato, 'VDSL technology and its relationships with EMC, Proceedings ISSLS Conference, Venice, maart 1998, blz. 359.
- [15] [CENELEC Standard prEN50174-2 (draft), 'Information technology – Cabling installation; part 2: installation planning and practices inside buildings', drafted by TC215, juni 1998.
- [16] [CENELEC draft prEN50083-8, 'Cabled distribution systems for television, sound and interactive multimedia signals; Part 8: EMC for installations', 1997.

CV

Pierre Beeckman werd geboren in 1954 in Sint Jansteen (Zeeuws-Vlaanderen). In 1975 heeft hij in Breda het HTS-E diploma (cum laude) behaald. In 1981 is hij afgestudeerd aan de Technische Hogeschool in Eindhoven bij de vakgroep Theoretische Elektrotechniek. Daarna was ook bij deze vakgroep werkzaam als wetenschappelijk assistent. Daar heeft hij gedurende vier jaar, in dienst van Stichting Technische Wetenschappen, onderzoek verricht naar de toepassing van compacte antennemeetmethoden. In 1987 is hij op dit onderwerp gepromoveerd. Vanaf 1996 was hij voor een periode van ruim tien jaar werkzaam bij Fokker Aircraft op Schiphol. Daar was hij verantwoordelijk voor diverse EM-gerelateerde ontwerp- en certificatieaspecten van vliegtuigen, zoals antennesystemen, radomes en EMC. Vanaf 1996 werkt hij bij Philips Research in Eindhoven. Daar leidt hij het EMC Cluster waar men op het gebied van EMC bezig is met onderzoek, certificatiemetingen en advisering. Zijn huidige EMC activiteiten richten zich vooral op de ontwikkeling van gestandaardiseerde EMC meetmethoden en op de gezondheidsaspecten van EM-velden (EMF). In verband met dit EMC en EMF werk is hij lid van een aantal nationale en internationale standaardisatiecomités. Verder is hij als cursusleider en docent betrokken bij de PATO EMC cursus.

