

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. P. Regtien,
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

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-
kel en 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 hoofd-
redacteur 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
dr. ir. C.J.M. Verhoeven, redactielid
ITS, TU Delft
Mekelweg 4, 2628 CD Delft

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

ISSN 03743853



INHOUD

Van de voorzitter	34
<i>Wim van Etten</i>	
Van de redactie	36
<i>Bart Smolders</i>	
Integrated optoelectronics in Indium Phosphide Technology	37
<i>dr. Chrétien Herben</i>	
Impedantie van de ideale condensator.	44
<i>ir. Ferd van Odenhoven</i>	
Gevaarlijk terrein!	47
<i>ir P. van der Wurff</i>	
Een vonk slaat over	51
<i>Prof. dr. ir. J.C. Haartsen</i>	



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

Van de voorzitter

Wim van Etten
tel. 053-4893872
e-mail: etten@cs.utwente.nl



Door het houden van de Algemene Ledenvergadering op 3 april i.l. is formeel weer een verenigingsjaar afgesloten en zijn de plannen voor het lopende jaar gepresenteerd. De jaarstukken geven binnen de vereniging meestal weinig aanleiding tot commotie, en zo hoort het ook. Het is een teken dat de leden in grote lijnen tevreden zijn over het bestuursbeleid en vertrouwen daarin hebben. Dankzij de onlangs ingevoerde contributieverhoging kon het bestuur een sluitende begroting 2001 presenteren, hetgeen tot algemene tevredenheid stemde. Meer discussie ontstond over de cijfers in het financiële gedeelte van het jaarverslag 2000. Dit en komend jaar staat URSI extra in onze belangstelling, omdat de General Assembly in 2002 gehouden wordt in Maastricht en het Nederlands URSI-comité en het NERG ten nauwste betrokken zijn bij de organisatie van dat evenement. Zoals u wellicht weet, functioneert het Nederlands URSI-comité als een NERG-comité in de zin zoals omschreven in onze statuten. Tussen de penningmeester en enkele leden ontstond een discussie over de financiële relatie tussen het NERG en het comité en hoe dientengevolge de cijfers van het URSI-comité dienen te worden gepresenteerd. Aangezien de juridische relatie tussen NERG en het Nederlands

URSI-comité op dit punt niemand tot in detail duidelijk was, is na ampel beraad toch akkoord gegaan met de presentatie zoals het bestuur die in het jaarverslag heeft gegeven. Wel heeft het bestuur op zich genomen die juridische onduidelijkheid de komend tijd op te helderen.

Verder was er kritiek op het punt van de themabijeenkomsten, met name de te lage frequentie daarvan, naar de mening van enkele leden. Het bestuur replieerde door op te merken dat de programma-commissie het afgelopen jaar te maken kreeg met een situatie waarin een lid enige maanden verhinderd was actief te participeren en een ander, nieuw lid reeds na enkele maanden lidmaatschap naar het buitenland vertrok en derhalve ook niet meer beschikbaar was. Overigens bezint de commissie zich momenteel op de aard van de themabijeenkomsten en ligt aanvulling van het aantal commissie-leden in het verschiet.

Een ander belangrijk aspect van onze vereniging, het Tijdschrift, heeft het afgelopen jaar prima gefunctioneerd. De uiterlijke vorm is zo ongeveer gestabiliseerd en de tijdschriftcommissie verheugt zich in een flink aanbod van artikelen. Klein minpuntje is de samenwerking met het Kluwer-concern gebleken. Bij de vorige ALV heeft het bestuur de

leden toestemming gevraagd om met die uitgever een contract te mogen sluiten voor de realisatie van de verschillende nummers, d.w.z. de verzorging van de lay-out, het drukwerk en de verzending, en niet te vergeten de advertentiewerving. Hoewel er destijds wat aarzeling bestond, werd uiteindelijk die toestemming toch gegeven, onder voorwaarde dat het bestuur dit jaar op de ALV een evaluatie-nota zou voorleggen over de samenwerking. Toen het bestuur, mede naar aanleiding van enkele kritische opmerkingen uit de ALV, het concept-contract met Kluwer enigszins wilde aanscherpen, kwam Kluwer met een sterke verhoging van de prijs, die voor ons onaanvaardbaar was. Ook door Kluwer voorgestelde alternatieven konden geen genade vinden, omdat die het zelfstandig karakter van ons tijdschrift zouden aantasten. Daarop is de samenwerking met Kluwer beëindigd. Wel hebben we de verworvenheden m.b.t. vormgeving die het afgelopen jaar in samenwerking met Kluwer zijn gerealiseerd op dit punt kunnen veiligstellen. Het Tijdschrift zal voorlopig weer in eigen beheer worden gerealiseerd. In de loop van het jaar zal onderzocht worden hoe we verder zullen gaan. Voorwaarde dient steeds te blijven een onafhankelijk tijdschrift met een eigen NERG-

redactie en behoud van de huidige kwaliteit.

Verder kwam nog aan de orde een tweetal wijzigingen op het Huishoudelijk Reglement. Eén daarvan vloeit voort uit de invoering van de Euro per 1-1-2002. We moeten dan nl. de contributie vaststellen in Euro. Aangezien we onlangs een contributie-verhoging hebben ingevoerd, was het bestuursvoorstel om na omrekening een afronding te doen op hele Euros naar beneden. De ALV wilde dit stellen op halve Euros, hetgeen geen onoverkomelijk probleem is voor het bestuur. Verder werd het Huishoudelijk Reglement aangepast op het punt van contributieberekening voor leden die slechts een gedeelte van een jaar lid zijn. De aanpassing is niet fundamenteel en dient slechts om de administratie te vereenvoudigen.

Tenslotte de bestuursmutaties; aftredend en statutair niet herkiesbaar was prof. dr. ir. Peter Zwamborn. Hij heeft de volle periode van 6 bestuursjaren in het bestuur gediend. Eerst als lid van de programmacommissie, later als voorzitter van die commissie en het laatste jaar als

vice-voorzitter van het NERG-bestuur. Namens u allen wil ik Peter hier hartelijk danken voor zijn inzet al die jaren. Als opvolger is, op voorstel van het bestuur, bij acclamatie gekozen prof. dr. ir. P. (Paul) Regtien, voor de meesten van u geen onbekende, veronderstel ik. Hij heeft nl. in het verleden al eens deel uitgemaakt van het bestuur. Een drietal bestuursleden werd herkozen, te weten ondergetekende, dr. ir. W. (Guido) Dolmans en dr. ir. A. (Bart) Smolders. Tenslotte heeft helaas de secretaris besloten terug te treden. Hij kan zijn taak als bestuurssecretaris niet meer verenigen met zijn (drukke) baan en verdere opleiding. Ook dr. Marc van den Homberg wil ik hartelijk danken voor zijn inzet. De taak van secretaris is tamelijk veeleisend en Marc heeft die taak drie jaar lang met grote inzet en accuratesse uitgevoerd. Tot onze spijt hebben wij tot nu toe geen opvolger voor hem kunnen vinden, evenals we nog steeds zoeken naar iemand die de ledenwervingsmanager kan steunen in zijn taken. Dit is momenteel een algemeen en groot probleem voor onze vereniging. Het wordt steeds moeilijker om leden bereid te vinden

om zich in te zetten voor een bestuursfunctie. Veelal is die aarzeling gebaseerd op het feit, dat heden ten dage werkgevers zeer veel eisen van hun werknemers en niet graag zien, dat tijd besteed wordt aan dit soort bestuurstaken, waarvan de werkgevers niet direct het nut en rendement zien. De vervulling van zo'n functie kan echter een unieke persoonlijk ervaring leveren, een sterke verrijking zijn en een grote voldoening geven. Bovendien levert het een onschatbaar netwerk op, waarvan men gedurende de rest van zijn carrière kan profiteren. Ik wil dan ook leden die menen de capaciteiten te bezitten om een dergelijke taak op zich te nemen en wat tijd kunnen en willen vrijmaken, oproepen zich aan te melden bij ondergetekende. Onze vereniging is volkomen afhankelijk van de belangeloze inzet van vrijwilligers. Enerzijds maakt ons dat kwetsbaar, maar anderzijds scheidt dat ook een grote mate van onafhankelijkheid. Ik zie u reacties hierop vol spanning tegemoet.

Wim van Etten,



Van de redactie

Bart Smolders
Voorzitter Tijdschriftcommissie
Smolders@ieee.org



Na de late verschijning van het eerste nummer van dit jaar, is het de redactie toch nog gelukt om voor de zomervakantie het tweede nummer uit te brengen. Gelukkig voor U als NERG lid, want wat zou U anders moeten lezen aan het zwembad? In de afgelopen jaren begint het een traditie te worden dat de eerste twee nummers van het jaar voor de zomervakantie verschijnen (of tijdens) en dat de overige drie nummers in een relatief korte periode na de zomervakantie verschijnen. Ieder jaar weer nemen we ons voor om aan deze onbalans iets te doen, maar er is telkens wel weer een reden waarom dit toch niet uitkomt. Niettemin zullen we ook dit jaar weer ons best doen om voor 31-12-2001 nummer 5 bij U thuis te laten bezorgen.

De trouwe lezers zullen zich nog van het vorige nummer herinneren dat de vorig jaar ingezette samenwerking met Kluwer dit jaar geen vervolg heeft gekregen. Als lezer merkt U hier overigens niet veel van. De nieuwe huisstijl is namelijk onveranderd gebleven. Voor de redactie heeft de eenzijdige beëindiging van de

samenwerking door Kluwer de beoogde plannen behoorlijk in de war gestuurd. We hadden verwacht dit jaar in een wat rustiger vaarwater terecht te komen, waardoor we weer meer aandacht aan de inhoud zouden kunnen geven. Helaas mocht dit niet zo zijn, waardoor we weer erg veel tijd kwijt zijn aan de organisatie van het Tijdschrift. Op dit moment bereiden we een nieuw plan voor rondom de toekomstige productie van het Tijdschrift. Uiteraard zullen we trachten de financiële lasten beperkt te houden waarbij we geen afbreuk willen doen aan de huidige kwaliteit.

Om de kwaliteit van het Tijdschrift verder te verbeteren, zouden we U als NERG-lid nogmaals willen uitnodigen een bijdrage te leveren aan het Tijdschrift, bijvoorbeeld in de vorm van een artikel over een actueel onderwerp waarvan U enige specifieke kennis heeft. Alle ideeën zijn welkom. Meer details vindt U op de binnenzijde van de omslag.

Dit nummer bevat een aantal uiteenlopende bijdrages. We

hebben bijvoorbeeld een bijdrage van een van de grondleggers van het veelbesproken Bluetooth concept, namelijk van Jaap Haartsen. De bijdrage is gebaseerd op de introerede die Jaap Haartsen uitgesproken heeft bij het aanvaarden van het ambt van hoogleraar aan de Universiteit Twente. Jaap Haartsen stond vorig jaar ook al in de belangstelling doordat hij een van de winnaars van de Vederprijs was. Een ander artikel is geschreven door Chrétien Herben en gaat in op de wereld van de geïntegreerde opto-electronika. Verder in dit nummer een aantal bijdrages die wellicht weer een voedingsbodem kunnen zijn voor een nieuwe discussie binnen het NERG. De vorige discussie in het Tijdschrift over het wel en wee van de condensator-impedantie heeft veel leden kunnen boeien. We hopen dan ook op een vervolg hierop.

Namens de redactie van het Tijdschrift van het NERG wens ik U een prettige zomervakantie toe met ook dit maal weer veel leesplezier.



Integrated optoelectronics in Indium Phosphide Technology

dr. Chrétien Herben
ThreeFive Photonics BV, Delft
herben@35ph.com



Introduction

Today's commercial optical communication systems are developed for use in Wavelength Division Multiplexed (WDM) point-to-point transmission. Signals at multiple wavelengths are simultaneously sent through a single fiber. The next step will be the use of WDM in more advanced network applications, such as ring and/or mesh networks. This requires devices that can handle the complexity of multi-wavelength signals, such as tunable or multi-wavelength transmitters and receivers, WDM add-drops and cross-connects. Most of these subsystems are assembled from discrete components, which are mutually coupled by means of fibers. Photonic integration of these devices has the potential to reduce packaging cost and size by eliminating most of the interconnection fibers. At the same time it leads to a drastic reduction in volume and power consumption of complex devices.

Photonic Integration leads to a drastic reduction in volume and interconnection costs of complex optical circuits and devices required in high-capacity

telecommunication networks. Figure 1 shows a 4-wavelength 2x2 cross connect realized in today's most compact fiber-based technology, the device is slightly larger than a laptop. The picture on the right shows a similar device integrated on an Indium Phosphide (InP) chip smaller than 1 cm² [1]. The reduction in packaging cost is probably an even greater advantage: the left device contains thirty-six fiber-chip connections; integration reduces this number to four by eliminating sixteen fiber jumpers. For more complex circuits the advantage becomes even more pronounced.

For Photonic Integrated Circuits to become commercially viable it is necessary to reduce the variety of devices and fabrication technologies. We have chosen for an approach based on three types of elementary components: *passive waveguide devices* (PWDs), *electro-optical phase modulators* (PHMs) and *semiconductor optical amplifiers* (SOAs), from which most of the functions required in advanced optical systems can be synthesized. Figure 2 shows the three basic building blocks and some examples of devices that can be realised using various combina-

Figure 1a: Compact fibre-based cross-connect module (Telefonica I+D, Madrid)

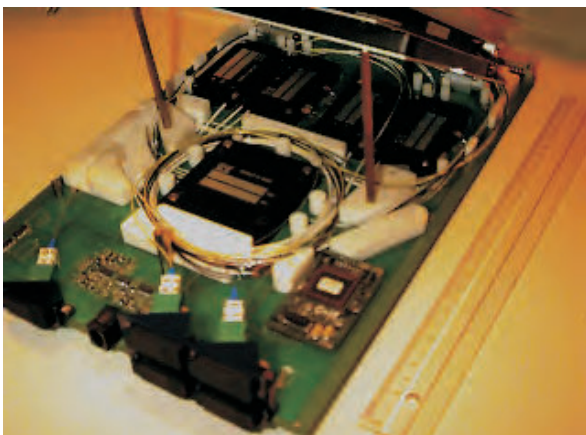
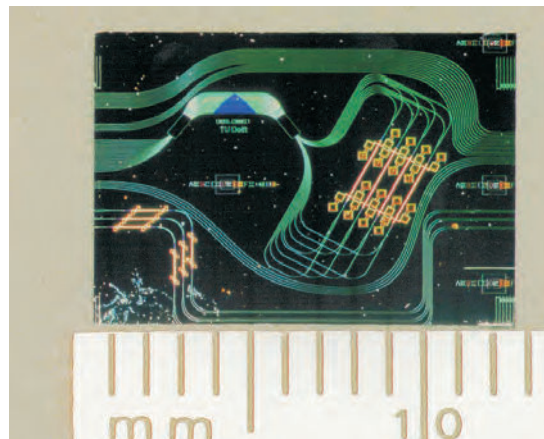


Figure 1b: Photonic Integrated cross-connect chip (Delft University of Technology)



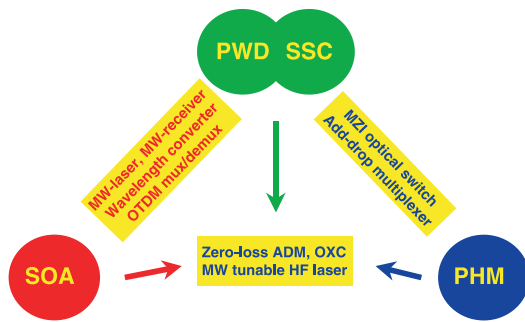


Figure 2: Building blocks

tions of these building blocks. In order to monolithically integrate these three types of elementary components one generic integration technology should be used. Many different planar technologies are being used for Photonic integrated circuits. Examples are Silica-on-Silicon, Lithium Niobate, Glass, Polymer and Indium Phosphide. Most of these technologies however are only suitable for realising passive waveguide devices. Indium Phosphide is the only technology with the capabilities to cover all three elementary components.

Indium Phosphide

Being a III-V semiconductor material, Indium Phosphide has a bandgap energy: the material is opaque for light of which the photon energy is higher than the bandgap energy, and transparent for light of which the photon energy is below the bandgap energy. Not only the binary material InP, but also the ternary and quaternary alloys InGaAs and InGaAsP can be epitaxially grown lattice matched on an InP substrate. By changing the composition of the quaternary material, the bandgap wavelength can be tuned anywhere between 0.92 μm and 1.65 μm . This offers the possibility to provide active (absorption or gain) and passive (transparent) functions for any wavelength in the telecommunication window between 1.25-1.65 μm . Like many III-V semiconductors, the bandgap of InP is *direct*, which enables fabrication of fast absorption modulators and photo-detectors, as well as optical amplifiers. As the energy bandgap is close to photon energy, electro-optical effects are relatively strong. InP has a very strong potential for the fabrication of Photonic Integrated Circuits, in which active optical components such as lasers, amplifiers, and optical switches are combined with passive elements such as (de)multiplexers, splitters and couplers on a single chip. Moreover, InP is suitable for integration of the electrical drive circuitry as well, providing very powerful and cost effective

solutions for implementing high-speed optical systems.

Passive Waveguide Devices

Passive waveguide devices such as splitters, couplers and wavelength (de)multiplexers fabricated in Silica-on-Silicon, glass or polymer are presently commercially available. As compared to these devices, InP-based passive waveguide devices are typically one or two orders of magnitude smaller thanks to the high refractive index contrast. Drawbacks of this small size, however, are the more stringent demands on fabrication technology, especially concerning lithography and etching. Furthermore, fiber-chip coupling is difficult due to the large mismatch between the waveguide and the fiber mode. To overcome this last hurdle, a Spot-Size Converter (SSC) structure can be used. This tapered structure enlarges the size of the optical mode on the chip to match with the fiber mode. On one side the SSC consists of a normal InP waveguide, and on the other side the SSC has a waveguide that allows for a low-loss coupling to a fiber.

The use of SSCs has two advantages. Besides the reduced coupling loss, the alignment tolerances to a cleaved single-mode fiber are also improved. The latter is particularly important when connecting an *array* of fibers to a chip.

Phased-array wavelength demultiplexer

A key passive waveguide device in Photonic Integrated Circuits (PICs) for WDM applications is the phased-array wavelength demultiplexer [2] (or Arrayed Waveguide Grating, AWG). Since its invention in 1988 by prof. Smit of the Delft University the device has been realized in virtually any integrated optics technology. Thanks to its excellent characteristics and ease of fabrication the AWG is currently one of the key components in WDM networks and because it is a planar waveguide device it can be readily integrated with other planar components making it an even more important component in future more complex WDM devices.

The best results are obtained with silica-on-silicon technology in which AWGs with as many as 256 channels have been reported as well as devices with an extremely low loss (~ 0.8 dB fibre-to-fibre). Although the performance of the InP-based AWGs is still lagging behind Silica-on-Silicon devices, it is steadily improving. Since InP-based devices are smaller by one or two orders they are especially

suitable for complex circuits. An ultra compact PHASAR measuring only 0.5 mm^2 with less than 3 dB loss was reported by the author [3]. Thanks to the integration of SOAs and fast electro-optic switches, InP-technology will provide competitive solutions.

Semiconductor Optical Amplifiers

The integration of Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs) makes it possible to improve the performance of the photonic circuits, as well as to increase their functionality.

In the first place, integrated SOAs can provide on-chip gain to compensate for device losses and fiber-chip coupling losses. Furthermore, the SOA can be used for gate switching of optical signals, i.e. the signals are either amplified or absorbed by the SOA. Due to the non-linear characteristics of SOAs, these devices offer incorporation of additional functionalities, such as wavelength conversion and signal regeneration using for example SOA-based Cross-Phase Modulation (XPM) wavelength converters. These converters do not only convert a WDM signal to another wavelength, but also provide 2R regeneration, i.e. amplification and pulse reshaping. XPM wavelength converters employ a Mach-Zehnder interferometer structure, and cannot be realized using fiber-connected stand-alone SOAs because of phase stability problems. Photonic integration is the only way to arrive at a stable and compact solution.

Electro-optic modulators

The strong electro-optic effects in the quaternary compound InGaAsP can be used to induce a change in the refractive index and/or the absorption, which in turn can be used for either phase modulation or amplitude modulation.

The refractive index changes are caused either by carrier-induced effects such as free-carrier injection or depletion, or by field-induced effects. The polarization insensitive carrier-induced index changes are due to free-carrier plasma and bandfilling/shrinkage effects. Using carrier injection, the switching speed is limited by the time it takes to eliminate free carriers from the semiconductor layer (limited to approximately nanoseconds by carrier recombination times). Applying an electric field to achieve carrier depletion can increase the speed. On the other hand, field-induced effects such as the linear Pockels' effect and the quadratic Kerr effect

are fast by nature, and offer the possibility to achieve very high switching speeds at virtually no power consumption. Polarization insensitivity of these effects can be achieved by design.

An example of the application of the fast electro-optic index changes is the Mach-Zehnder Interferometer-based space switch. The switching operation of this device is based on the application of a reverse bias voltage over a pin-junction in the waveguide. With a switching voltage of about 5 Volts and a current in the order of nano-Ampères, these switches are extremely power friendly, which makes them an interesting alternative to thermo-optic switches as used in Silica-on-Silicon or glass technology. Drawback of integrated switches is their rather poor crosstalk suppression as compared to mechanical switches. By proper design, however, a crosstalk suppression as good as 40 dB has been demonstrated using integrated InP-based MZI switches. Thanks to the high speeds that can be obtained using the electro-optic effects, the Mach-Zehnder Interferometer-based space switches can also be used as fast amplitude modulators. Combining them with active devices such as lasers and/or amplifiers enables the realization of high-speed transmitters.

High-frequency electronics

Besides its use in integrated optical circuits, InP also offers great possibilities for integration of electronics. Electronic devices and circuits fabricated from GaAs have carved out a niche in applications that demand high speed, low noise, and cannot be satisfied by silicon technology. With continuing advances in silicon technology, however, the performance gap between Si and GaAs is closing. Therefore, interest has grown in InP-based electronics, where the superior transport properties of InGaAs can be exploited.

In opto-electronic devices, the integration of electrical functions in the same material as the optical functions offers the possibility to monolithically combine e.g. the receiver preamplifier and the modulator driver with the photo-detector and phase modulator, respectively. Most successful are the Single Heterojunction Bipolar Transistors (SHBTs), used for the receiver since photo-detectors are easily integrated using the epitaxial layers of the transistors, while Double Heterojunction Bipolar Transistors (DHBTs) are used in the modulator driver to enable larger signal voltages.

Examples of monolithically integrated WDM devices

The key component in Photonic Integrated Circuits (PICs) for WDM applications is the phased-array wavelength (De)multiplexer (also called Arrayed Waveguide Grating, AWG). Most devices required in advanced WDM systems can be realised using a combination of AWGs, Semiconductor Optical Amplifiers (SOAs) and optical switches. Figure 3

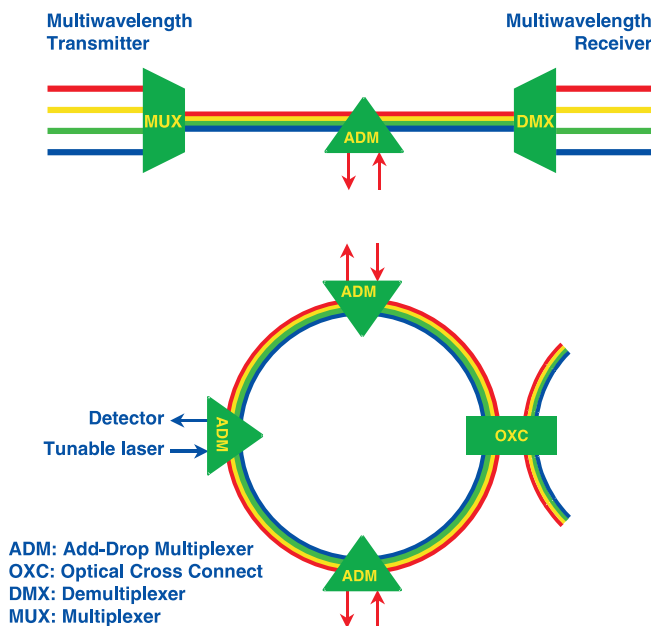


Figure 3: WDM network

shows the key elements of a WDM point-to-point and ring network. A single WDM link requires a multi-wavelength transmitter on one side and a multi-wavelength receiver on the other side. WDM add/drop nodes can be inserted in the link to enable adding and dropping signals at intermediate locations. In more complex network architectures, such as a ring network, nodes that connect the various rings should be capable of selectively switching multiple wavelengths. These nodes are called cross connects. All of these network elements have been demonstrated monolithically integrated in InP-technology.

Multi-wavelength transmitter

An example of a useful functionality that can only be achieved using an integration approach is the Multi-Wavelength Laser (MWL). Today's WDM systems use wavelength-selected or tuneable lasers as sources multiplexed into one fibre using a power combiner or wavelength multiplexer. A disadvantage of this solution is the large number of indi-

vidual lasers required, each of which has to be wavelength controlled individually. Integrated MWLs have been realised by combining an array of lasers operating at the correct wavelengths with a power combiner. Even though the use of a power combiner inherently introduces a loss of $10 \log N$ dB, with N the number of wavelength channels, a high fibre coupled power of +10 dBm was demonstrated for an 8-channel device. However, for large numbers of wavelength channels the combiner losses will become a serious problem.

Using an AWG wavelength multiplexer to combine the wavelength signals can drastically reduce the combiner loss. Since the multiplexer has a wavelength selective response, broadband semiconductor amplifiers can be used. Lasing will occur at the passband wavelengths of the AWG. The lasing wavelengths of the MWL are determined by the characteristics of the AWG, providing a comb of accurately spaced lasing wavelengths. Figure 4 shows an example of such an integrated MWL [4].

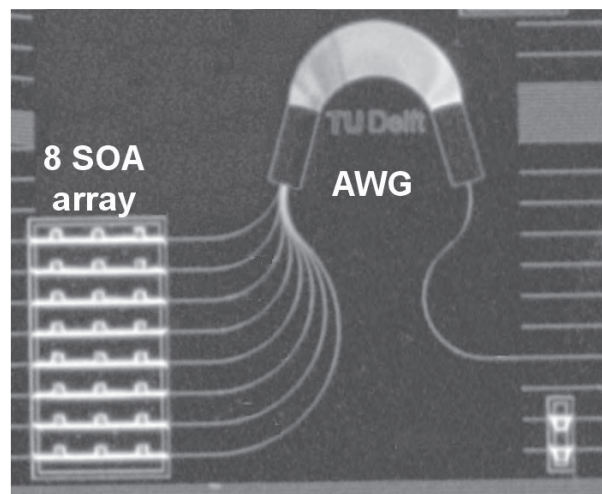


Figure 4: MWL

Multi-wavelength receiver

In InP-technology, fast photo-detectors can be realised using an InGaAs absorption layer in a pin structure. In an optimized edge-illuminated detector design with a length of typically 50 microns, both high speed (> 20 GHz) and high quantum efficiency ($> 90\%$) can be obtained simultaneously. Such a pin photo-detector can be easily integrated with passive waveguide devices.

Figure 5 shows an example of a multi-wavelength receiver consisting of an AWG integrated with eight high-speed photo-detectors. The multi-wavelength signal arriving at the receiver is first demul-

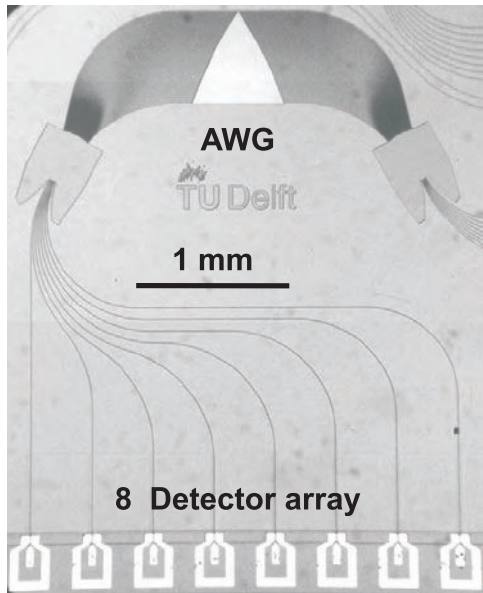


Figure 5: MWR

tiplexed to single wavelength signals, which are then each led to a separate photo-detector and converted to electrical signals [5].

WDM cross connects

In its most elementary form a WDM cross connect is a device capable of cross-connecting multi-wavelength signals independently between two lines. Such a cross connect consists of wavelength demultiplexers, space switches and multiplexers. The incoming multi-wavelength signals are first demultiplexed to single wavelength signals. These are then sorted by wavelength and fed to the space switches. Each wavelength is switched by a separate space switch. The switches cross-connect the signals if required. Then the various signals are sorted again and (re)multiplexed. Figure 6 shows a functional scheme of a 4 wavelength 2x2 cross connect.

Monolithic integration of wavelength selective switches or WDM cross-connects was first reported in silica technology using a combination of wave-

length (de)multiplexers with thermo optic space switches. A 16-channel device with fibre-to-fibre losses of about 10 dB and a crosstalk level of better than -31 dB was realized by NTT already in 1996. More recently they reported an athermal WDM cross connect with a crosstalk better than -35 dB and a fibre-to-fibre insertion loss of < 12dB over a temperature range of 10-80 °C. In both cases the good crosstalk values were obtained using double-stage (or dilated) switches.

In InP-technology the author has reported several WDM cross-connects using different arrangements of AWGs and electro optic Mach-Zehnder Interferometer switches. The first device, containing a single AWG to avoid spectral misalignment between demultiplexer and multiplexer, suffered from multipath interference and showed a crosstalk of only -13 dB despite the switch crosstalk of better than -16 dB [1]. A detailed study of the crosstalk behaviour of different cross-connect configurations resulted in an optimal configuration with a minimum number of separate AWGs [6]. This resulted in the realisation of an InP-based cross-connect with dilated switches with a crosstalk of less than -20 dB [7], which is the best reported so far on InP (Figure 7).

To demonstrate the potential of miniaturization using Indium Phosphide integration an extremely compact WDM cross connect was realised using a double etch technology [8]. Figure 8 show a photograph of the device that contains four separate AWGs integrated with four Mach-Zehnder Interferometer space switches measures only 1.5 x 3 mm², making it by far the most compact WDM cross connect reported up to date. Perhaps even more important to mention it that the perfor-

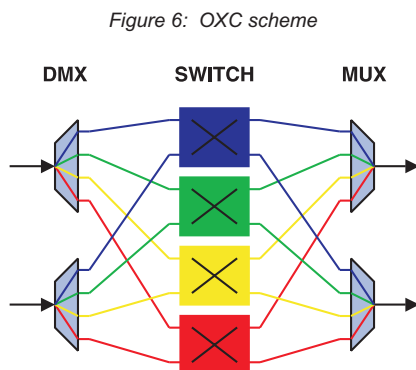
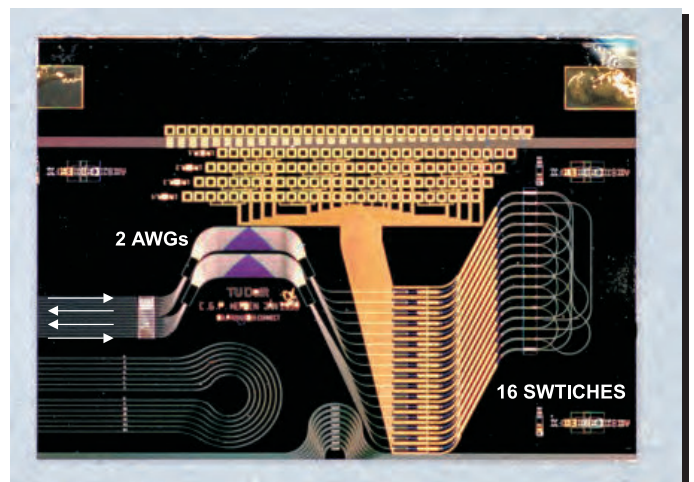


Figure 6: OXC scheme

Figure 7: dilated OXC



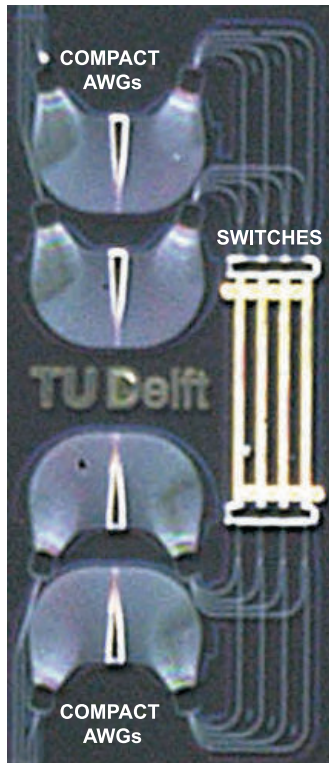


Figure 8: compact OXC

mance of the cross connect did not suffer from the reduction in size. In fact the extremely compact WDM cross connect showed comparable performance as compared to the earlier less compact devices using single stage switches in stead of a double-stage or dilated scheme. Crosstalk values of -40 dB have been reported for dilated switches in the same waveguide structure indicating that InP-based cross-connects can potentially obtain equally good crosstalk values as silica-based devices.

InP-technology, however, offers much more compact devices (10 to 100 times smaller in size), much lower power consumption (no current injection so virtually no power consumption) and much higher switching speeds (typically ns). Disadvantages of InP are the losses, which are still too high. Both the fibre coupling and on-chip losses need to be reduced and therefore much work is dedicated to spot-size converters and integrated optical amplification.

Conclusions

Mass application of optical components requires a scalable, cost-effective, compact and generic technology. InP is the ultimate candidate to fulfill all these needs. It offers the potential to monolithically

integrate ultra-compact optical components for signal (re)generation, amplification, detection, conversion, (de)multiplexing as well as ultra-high-speed electrical components. The development of a generic InP-based technology in which these optical and electrical functions can be realized will revolutionary change the future of optical communications.

Performance and fabrication costs of InP-based devices are still prohibitive for broad application, but they show steady improvement. The huge market for WDM lasers will accelerate the InP technology development and pave the way for integration processes, which will provide compact and cost-effective solutions for many functions in WDM applications.

References

- [1] C.G.P. Herben *et al.*, "A compact integrated InP-based single-PHASAR optical cross-connect", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, Vol. 10, No. 5, pp. 678-680, May 1998.
- [2] M.K. Smit and C. Van Dam, "PHASAR-based WDM devices: principles, design and applications", *J. of Sel. Topics in Quantum. Electron.*, Vol. 2, No. 2, pp. 236-250, June 1996.
- [3] C.G.P. Herben *et al.* "Low-loss and compact phased array demultiplexer using a double etch process", in *Proc. Eur. Conf on Int. Opt. (ECIO'99)*, Torino, April 13-16, 1999, pp. 211-214.
- [4] P.J. Harmsma *et al.* "Multi-Wavelength Lasers fabricated using Selective Area Chemical Beam Epitaxy", in *Proc. Integr. Photon. Res. (IPR'99)*, Sta. Barbara, USA, 1999, pp. 17-19.
- [5] C.A.M. Steenbergen *et al.* "Compact low-loss 8×10 GHz polarization independent WDM receiver" in *Proc. Eur. Conf on Opt. Comm. (ECOC'96)*, Oslo, Norway, September 15-19, 1996.
- [6] C.G.P. Herben *et al.*, "Crosstalk performance of integrated optical cross-connects", *J. of Lightwave Technol.*, vol. 17, no. 7, July 1999.
- [7] C.G.P. Herben *et al.*, "Polarization independent dilated WDM cross-connect on InP", *IEEE Photon. Electron. Lett.*, Vol. 11, No 12, pp. 1599-1601, December 1999.
- [8] C.G.P. Herben *et al.*, "Extremely compact WDM cross connect on InP", in *Proc. 5th IEEE LEOS annual symposium (Benelux Chapter)*, Delft, The Netherlands, October 30, 2000, pp. 17-20.

CV

Chrétien Herben was born in Sittard, The Netherlands, on October 10, 1972. He received his Masters degree in Applied Physics from the University of Twente in 1995. His Masters Thesis was carried out in the Applied Optics Group and concerned the design and characterisation of a scanning imaging confocal Raman microscope. In December 2000 he received his Ph.D degree (with honours) from the Delft University of Technology. The research was carried out at the Photonic Integrated Circuits group at the faculty of Information Technology and Systems. The subject of his Ph.D. work was Indium Phosphide-based integrated optical cross connects for Wavelength-Division Multiplexing Networks. Chrétien Herben realised the world's first integrated optical cross connect in Indium Phosphide as well as the most compact one reported so far. His work on the integrated optical cross connects was used in several European projects, such as ACTS-BLISS and ACTS-APEX and IST-METEOR. For his work on optical cross connects Chrétien Herben received the Veder Award 2000. In February 2001 he co-founded ThreeFive Photonics B.V. a spin-off company from the Photonic Integrated Circuits group of the Delft University of Technology. As Chief Technology Officer of ThreeFive Photonics he is currently responsible for taking the monolithic integration in Indium Phosphide to the next level: commercialisation.



Impedantie van de ideale condensator

ir. Ferd van Odenhoven
Fontys Hogeschool, Eindhoven
e-mail: f.vanodenhoven@fontys.nl

Inleiding

De discussie opgeworpen door Peter van de Wurf [1], heeft diverse artikelen in het Tijdschrift van het NERG opgeleverd, maar het laatste woord erover is nog niet gesproken. Er zijn oplossingen gegeven die de vraagstukken correct oplossen, maar het uitgangspunt was om consequent de Fourier Transformatie toe te passen en niet via andere wegen de problemen het hoofd te bieden. In dit artikel wordt een pragmatische oplossing gegeven, die ook de formule van Van der Pol en Bremmer [2] in ere houdt, maar nog niet alle vragen beantwoordt.

Het probleem

Kort samengevat komt de ongerijmdheid erop neer dat de impedantie van de condensator niet eenduidig gedefinieerd lijkt. Terwijl we altijd met $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$ werkten, wisten we ook dat, omdat de ideale condensator een ideale integrator is die de eenheidsstapfunctie als impulsresponsie heeft, de impedantie eigenlijk moet luiden: $Z_c = \frac{1}{C} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\}$. Deze laatste uitdrukking moeten we gebruiken als we met de Fourier Transformatie (FT) willen werken. De ongerijmdheden doen zich in het algemene geval dan voor als we eeningangssignaal kiezen dat eigenfuncties van het ge-exciteerde systeem bevat. Bij de ideale condensator is dat bijvoorbeeld het geval als we de stapresponsie willen bepalen. Die is gelijk aan de taludfunctie: $\frac{t}{C}u(t)$ waarin $u(t)$ de eenheidsstapfunctie is. De FT van deze uitkomst is echter niet gelijk aan het product van de Fouriergetransformeerden van hetingangssignaal $u(t)$ en de impulsresponsie $h(t) = C^{-1}u(t)$:

$$\frac{t}{C}u(t) \leftrightarrow \frac{1}{C} \left\{ \left(\frac{1}{j\omega} \right)^2 + j\pi\delta'(\omega) \right\} \neq \frac{1}{C} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \quad (1)$$

Het product van twee identieke delta-functies is niet gedefinieerd, dus de convolutie eigenschap mag hier blijkbaar niet toegepast worden. Door voor de im-

pedantie de uitdrukking: $Z_c = \frac{1}{j\omega C}$ te nemen krijgen we voor het rechterlid in (1):

$$\frac{1}{j\omega C} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \quad (2)$$

Hiermee kunnen we ook niet veel, maar de volgende formule van Van der Pol en Bremmer [2], die deze met hun Operational Calculus afleiden:

$$\frac{\delta(\omega)}{\omega^n} = (-1)^n \frac{\delta^{(n)}(\omega)}{n!} \quad (3)$$

brengt ons naar het juiste resultaat, want nu schrijven we:

$$\begin{aligned} \frac{1}{j\omega C} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} &= \frac{1}{C} \left\{ \left(\frac{1}{j\omega} \right)^2 - j\pi \frac{\delta(\omega)}{\omega} \right\} \\ &= \frac{1}{C} \left\{ \left(\frac{1}{j\omega} \right)^2 + j\pi\delta'(\omega) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

Het lijkt alsof we hier dus de eerstgenoemde impedantieformule dienden te gebruiken. Verder bestaan tegen deze werkwijze veel bezwaren, zo blijkt wel uit de geplaatste artikelen in het Tijdschrift van het NERG.

Een pragmatische oplossing

In het algemene geval beschouwen we nu de situatie waar het systeem een pool $s = jp$ op de imaginaire as heeft en hetingangssignaal $x(t)$ een sinusvormige component bevat met frequentie q . De twee signalen $h(t)$ en $x(t)$ hebben dan Laplace getransformeerden van de volgende vorm:

$$H(s) = F(s) + \frac{A}{s - jp}, \quad (5)$$

$$X(s) = G(s) + \frac{B}{s - jq}. \quad (6)$$

$F(s)$ en $G(s)$ bezitten beide geen polen in $s = jp$ en of $s = jq$. De convolutie $h(t) * x(t)$ transformeert dan als het product: $Y(s) = H(s) \cdot X(s)$. Eerst

berekenen we $Y(j\omega) = \lim_{s \rightarrow j\omega} Y(s)$. Dat vergelijken we dan met het resultaat van $H(j\omega)X(j\omega) = \{\lim_{s \rightarrow j\omega} H(s)\} \cdot \{\lim_{s \rightarrow j\omega} X(s)\}$. Die resultaten blijken gelijk te zijn zolang $p \neq q$.

Het geval van resonantie: als $p = q$, moeten we nu nader beschouwen. We nemen eerst de limiet $q \rightarrow p$ in de uitdrukking voor $Y(j\omega)$; dat levert op:

$$\begin{aligned} \lim_{q \rightarrow p} Y(j\omega) &= F(j\omega)G(j\omega) + \\ &[A \cdot G(j\omega) + B \cdot F(j\omega)] \left[\frac{1}{j(\omega - p)} + \pi\delta(\omega - p) \right] + \\ &AB \left[\frac{-1}{(\omega - p)^2} + j\pi\delta'(\omega - p) \right] \end{aligned} \quad (7)$$

Dit moeten we nu vergelijken met het product $H(j\omega) \cdot X(j\omega)$ waarbij we in $X(j\omega)$ de frequentie q vervangen door p :

$$\begin{aligned} H(j\omega) \cdot X(j\omega) &= F(j\omega)G(j\omega) + \\ &[A \cdot G(j\omega) + B \cdot F(j\omega)] \left[\frac{1}{j(\omega - p)} + \pi\delta(\omega - p) \right] + \\ &AB \left[\frac{1}{j(\omega - p)} + \pi\delta(\omega - p) \right]^2 \end{aligned} \quad (8)$$

Als we dit resultaat vergelijken met (7) dan verschillen deze alleen in de laatste term; blijkbaar moeten we dus de laatste term in (8) vervangen door de laatste term in (7). In het meest algemene geval komen we termen van de volgende vorm tegen:

$$\left(\frac{1}{s - jp} \right)^n \left(\frac{1}{s - jp} \right)^m \quad (9)$$

Wanneer we de beide factoren elk afzonderlijk omzetten naar het Fourier-domein (zie bijvoorbeeld: [3]) volgt er:

$$\begin{aligned} &\left[\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^n + \frac{j^{n-1}\pi}{(n-1)!} \delta^{(n-1)}(\omega - p) \right] \\ &\cdot \left[\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^m + \frac{j^{m-1}\pi}{(m-1)!} \delta^{(m-1)}(\omega - p) \right] \end{aligned} \quad (10)$$

Dit dienen we te vervangen door de omzetting van $(s - jp)^{-(m+n)}$ naar het Fourier-domein:

$$\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^{m+n} + \frac{j^{m+n-1}\pi}{(m+n-1)!} \delta^{(m+n-1)}(\omega - p) \quad (11)$$

Deze vervanging kan met behulp van de identiteit (3) van Van der Pol en Bremmer bepaald worden. Als eerste stap schrijven we voor (10):

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^n \left[1 + \frac{(-1)^n \pi}{j(n-1)!} (\omega - p)^n \delta^{(n-1)}(\omega - p) \right] \\ &\cdot \left[\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^m + \frac{j^{m-1}\pi}{(m-1)!} \delta^{(m-1)}(\omega - p) \right] \end{aligned} \quad (12)$$

De tweede term in de linkse factor tussen rechte haken is nul vanwege een eigenschap van de Dirac δ -functie. Dan passen we nog tweemaal de identiteit (3) als volgt toe:

$$\begin{aligned} &\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^n \\ &\cdot \left[\left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^m + \frac{j^{m-1}\pi}{(m-1)!} \delta^{(m-1)}(\omega - p) \right] \\ &= \left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^{m+n} + \frac{j^{m-n-1}\pi}{(\omega - p)^n} \frac{\delta^{(m-1)}(\omega - p)}{(m-1)!} \\ &= \left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^{m+n} \\ &\quad + j^{m-n-1}\pi \frac{(-1)^{m-1} \delta^{(m-1)}(\omega - p)}{(\omega - p)^{m+n-1}} \\ &= \left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^{m+n} \\ &\quad + j^{m-n-1}\pi \frac{(-1)^{2m+n-2} \delta^{(m+n-1)}(\omega - p)}{(m+n-1)!} \\ &= \left(\frac{1}{j(\omega - p)} \right)^{m+n} \\ &\quad + \frac{j^{m+n-1}\pi}{(m+n-1)!} \delta^{(m+n-1)}(\omega - p) \end{aligned} \quad (13)$$

Passen we deze procedure als voorbeeld toe op het rechterlid van (1), waarin de juiste impedantieformule werd gebruikt, maar die een onhandelbare uitdrukking opleverde, dan volgt er:

$$\begin{aligned} &\frac{1}{C} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \\ &= \frac{1}{j\omega C} \{ 1 + \pi j\omega\delta(\omega) \} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \\ &= \frac{1}{j\omega C} \left\{ \frac{1}{j\omega} + \pi\delta(\omega) \right\} \\ &= \frac{1}{C} \left\{ \left(\frac{1}{j\omega} \right)^2 + \frac{\pi}{j} \frac{\delta(\omega)}{\omega} \right\} \\ &= \frac{1}{C} \left\{ \left(\frac{1}{j\omega} \right)^2 + j\pi\delta'(\omega) \right\} \end{aligned} \quad (14)$$

waarbij we in de laatste stap de identiteit van Van der Pol en Bremmer gebruikten. Op deze wijze is het product van de δ -functies op een-eenduidige manier weggewerkt.

Conclusie

Er is een regel gegenereerd die werkt, en die noodzakelijk is als we de Fourier Transformatie willen toepassen op marginaal instabiele systemen waarbij we ingangssignalen hebben die sinusvormige ongedempte eigentrillingen van het systeem bevatten.

Marginaal instabiele systemen hebben een of meer polen op de imaginaire as, maar niet in $\text{Re}(s) > 0$. De regel is niet strikt mathematisch verantwoord afgeleid, maar werd verkregen door vergelijking met het resultaat dat verkregen werd via de Laplace Transformatie en leidt daarom steeds naar het juiste resultaat. De regel gebruikt een identiteit van Van der Pol en Bremmer, die op het eerste gezicht erg losjes omgaat met de delta-distributie, maar die hier goed bruikbaar is. De praktische ingenieurs kunnen weer vooruit, maar de theoretici zijn nog niet klaar? De vraag blijft namelijk of de fout die we maken door de convolutie-eigenschap van de Fourier Transformatie te gebruiken weer 'gerepareerd' mag worden door de hier afgeleide regel toe te passen.

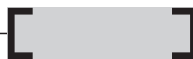
Referenties

- [1] P. v.d. Wurf, *Over condensator-impedanties en andere ongerijmdheden*, Tijdschr. v.h. NERG, Vol. 64, nr.2 (1999), p.82-83.
- [2] B.v.d.Pol and H. Bremmer, *Operational Calculus*, pagina 84, Cambridge at the University Press, 1950.
- [3] A. Papoulis, *The Fourier Integral and its Applications*, paragraaf 9.2: vergelijking (9-9), McGraw-Hill, 1962.

CV

Ferd J.F. van Odenhoven is afgestudeerd in 1978 aan de TUE afdeling elektrotechniek in de vakgroep theoretische elektrotechniek op het onderwerp rotatie van een gemagnetiseerde plasmakolom. In 1983 gepromoveerd aan de afdeling technische natuurkunde van de TUE op het gebied van de kinetische theorie van zwak geïoniseerde gassen.

Sinds 1984 werkzaam als hogeschooldocent aan de hts elektrotechniek in Venlo, nu onderdeel van fontys, o.a op de lesgebieden signaalverwerking en telecommunicatie. Daarna sinds 2000 werkzaam aan de fontys hogeschool informatica te Eindhoven, richting software engineering. Sinds 1999 als docent betrokken bij de cursus digital recording and transmission aan het ctt van philips.



Gevaarlijk terrein!

ir P. van der Wurff
Geldrop



Dictaten en leerboeken over systeemtheorie en Fourierwiskunde bevatten vaak een tabel met standaard-Fourierparen. In het bijzonder de paren $\delta(t) \Leftrightarrow 1$ en $1 \Leftrightarrow 2\pi\delta(\omega)$ kunnen studenten gevaarlijk terrein doen betreden, waar ze kunnen verdwalen in de mist en verdrinken in het moeras. Er is dringend behoefte aan een betrouwbare gids voor studenten (en hun begeleiders!).

Inleiding

In een recente publicatie in het NERG-tijdschrift [1] wordt gewezen op het feit dat sommige conceptuele en methodologische aspecten van Fourier- en Laplace-transformaties nog hiaten vertonen. Het is mijn bedoeling te laten zien hoe in de praktijk van het onderwijs een HBO- of WO-student, die uitgerust is met een voor zijn niveau behoorlijke kennis van Fourierwiskunde, zonder zich bewust te zijn van de in [1] bedoelde hiaten, kan verdwalen als hij zijn kennis toepast op het Fourierpaar

$$\delta(t) \Leftrightarrow 1, \quad (1)$$

dat te vinden is tussen de standaard-Fourierparen in de tabel van zijn leerboek of collegedictaat.

Differentiatie-theorema

Het differentiatie-theorema luidt:

$$\text{Als } g(t) \Leftrightarrow G(\omega) \quad (2)$$

$$\text{dan volgt } g'(t) \Leftrightarrow j\omega G(\omega). \quad (3)$$

Losgelaten op Fourierpaar (1) levert dit op:

$$\delta'(t) \Leftrightarrow j\omega. \quad (4)$$

Omdat de meeste leerboeken de afgeleide van $\delta(t)$ niet behandelen, moet de student, die het paar (4)

heeft gevonden, zich verdiepen in de betekenis van $\delta_-(t)$. Gelukkig staan er in de bibliotheek boeken, die de student verder kunnen helpen [2, 3].

Waar $\delta(t)$ gedefinieerd is d.m.v. de eigenschap

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta(t) \phi(t) dt = \phi(0), \quad (5)$$

blijkt de afgeleide van $\delta(t)$ gedefinieerd te worden door

$$\int_{-\infty}^{\infty} \delta'(t) \phi(t) dt = -\phi'(0), \quad (6)$$

(De student zal deze definities met integraalnotatie prefereren boven de notatie, die in [4] wordt gebruikt. In zijn vakgebied wordt de werking van $\delta(t)$ of $\delta_-(t)$ immers altijd gevonden via een berekening met een convolutie-integraal of een Fourier-integraal. De definitie-eigenschappen (5) en (6) zijn dan onmiddellijk toe te passen.)

Een berekening met twijfelachtige uitkomst

Omdat hij dat nodig heeft voor een bewijs in een verslag of afstudeerscriptie, onderzoekt de student de betekenis van het product $t \cdot \delta_-(t)$ en vindt met (6):

$$\int_{-\infty}^{\infty} t \cdot \delta'(t) \phi(t) dt = -\phi(0). \quad (7)$$

Het product $t \cdot \delta_-(t)$ heeft in een convolutie- of Fourierintegraal dezelfde werking als $-\delta(t)$ in (5). Dit rechtvaardigt de relatie:

$$t \cdot \delta'(t) = -\delta(t). \quad (8)$$

Uit (8) concludeert de student dat hij mag schrijven:

$$-t^{-1} \cdot \delta(t) = \delta'(t), \quad (9)$$

maar tot zijn verbazing is zijn docent het daar niet mee eens en verwijst naar een artikel in het NERG-tijdschrift [4].

Te gek voor woorden

Laten we aannemen dat we te maken hebben met een eigenwijze student. (Ik hou van eigenwijze studenten.) Hij vindt de afwijzing van (9) te gek voor woorden. Het zet de hele wereld van wiskundige rekenregels, zoals hij die zich heeft eigen gemaakt, op zijn kop. Gewapend met dictaten en leerboeken en een enkel 'geleerd' boek uit de bibliotheek gaat hij aan de slag om te proberen de juistheid van (9) te bewijzen.

Fouriertransformaties

Uit (6) volgt op eenvoudige wijze dat aan $\delta_-(t)$ een Fouriergetransformeerde $j\omega$ kan worden toegekend. Dat volgde ook direct uit het differentiatie-theorema (4). Hoe staat het met de Fouriergetransformeerde van $-t^{-1} \cdot \delta(t)$? Als deze voorlopig $X(\omega)$ wordt genoemd, dan volgt uit het differentiatie-theorema in het frequentiedomein:

$$-jt \left[-t^{-1} \cdot \delta(t) \right] \Leftrightarrow X'(\omega), \quad (10)$$

dus $X'(\omega)$ is de Fouriergetransformeerde van $j\delta(t)$. Dat kan alleen maar als geldt:

$$X(\omega) = j\omega. \quad (11)$$

De oplossing $X(\omega) = j(\omega + a)$ voldoet uiteraard ook, maar wordt door de student verworpen, omdat hij geleerd heeft dat het imaginaire deel van de Fouriergetransformeerde van een reële tijdfunctie gelijk is aan nul bij $\omega = 0$.

Uit (4) en (11) volgt dat $-t^{-1} \cdot \delta(t)$ en $\delta'(t)$ dezelfde Fouriergetransformeerde hebben en dat het er dus op lijkt dat uitdrukking (9) toch correct is. Niet zonder enige triomf legt hij dit resultaat voor aan zijn docent, die zich zuchtend kwijt aan de taak de redenering van zijn student door te prikken. Terwijl hij daarmee bezig is, verzamelt zijn student nog meer argumenten om (9) te staven.

Rijen die $\delta(t)$ en $\delta'(t)$ benaderen

In veel leerboeken wordt $\delta(t)$ gepresenteerd als de limiet van een rij functies. Zo is er een rij functies $f_\varepsilon(t)$ te bedenken, waarvoor geldt:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} f_\varepsilon(t) = \delta(t). \quad (12)$$

Voor de afgeleide $\delta'(t)$ zijn functies $g_\varepsilon(t)$ te bedenken, waarvoor geldt:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} g_\varepsilon(t) = \delta'(t). \quad (13)$$

Dit brengt de student op het volgende idee. Hij gaat uit van een $f_\varepsilon(t)$, die aan (12) voldoet en probeert te bewijzen dat met $g_\varepsilon(t) = -t^{-1} f_\varepsilon(t)$ voldaan wordt aan (13).

Hij vindt drie voorbeelden waarin zijn idee blijkt te werken.

Voorbeeld 1.

$$f_\varepsilon(t) = 0,5\delta(t + \varepsilon) + 0,5\delta(t - \varepsilon). \quad (14)$$

Het mag duidelijk zijn dat (14) voor $\varepsilon \rightarrow 0$ voldoet aan definitie-eigenschap (5).

Met $g_\varepsilon(t) = -t^{-1} f_\varepsilon(t)$ wordt gevonden:

$$g_\varepsilon(t) = (t^{-1}) [-0,5\delta(t + \varepsilon) - 0,5\delta(t - \varepsilon)]. \quad (15)$$

Onder toepassing van de bekende eigenschap $f(x)\delta(x - x_0) = f(x_0)\delta(x - x_0)$ wordt voor (15) gevonden:

$$g_\varepsilon(t) = \left[(2\varepsilon)^{-1} \right] [\delta(t + \varepsilon) - \delta(t - \varepsilon)] \quad (16)$$

Deze functie voldoet voor $\varepsilon \rightarrow 0$ aan definitie-eigenschap (6) en dat pleit voor de juistheid van formule (9).

Voorbeeld 2.

$$f_\varepsilon(t) = (\varepsilon)^{-2} |t| \text{ voor } t \leq \varepsilon \text{ en } f_\varepsilon(t) = 0 \text{ overal elders} \quad (17)$$

Met $g_\varepsilon(t) = -t^{-1} f_\varepsilon(t)$ wordt gevonden:

$$g_\varepsilon(t) = (\varepsilon)^{-2} \text{ voor } -\varepsilon < t < 0; g_\varepsilon(t) = -(\varepsilon)^{-2} \text{ voor } 0 \leq t < \varepsilon \text{ en } g_\varepsilon(t) = 0 \text{ overal elders} \quad (18)$$

Het moge duidelijk zijn dat voor $\varepsilon \rightarrow 0$ vergelijking (17) gaat voldoen aan definitie-eigenschap (5) en dat (18) gaat voldoen aan (6). Ook dat is een pleidooi voor de juistheid van (9).

In beide voorgaande voorbeelden heeft de student wel heel speciale functies voor $f_\varepsilon(t)$ gekozen om moeilijkheden met $g_\varepsilon(t)$ bij $t = 0$ te voorkomen. Daarom draagt hij nog een derde voorbeeld aan.

Voorbeeld 3.

$$\text{Beschouw } f_{\omega}(t) = [\sin(\omega t)] / \pi t. \quad (19)$$

Dit is een bekende functie, waarvoor bewezen is dat geldt:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} f_{\omega}(t) = \delta(t). \quad (20)$$

Deze wijsheid ontleent onze student aan een boek uit de bibliotheek, dat een gedegen verhandeling geeft over Fourierintegralen en hun toepassingen [2]. Nadat hij zich de redeneertrant van de auteur van [2] heeft eigen gemaakt, kan hij die als volgt toepassen.

Hij wil bewijzen dat voor $g_{\omega}(t) = -t^{-1} f_{\omega}(t)$ geldt:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} g_{\omega}(t) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} (-t^{-1}) [\sin(\omega t)] / \pi t \quad (21)$$

$$= \delta'(t)$$

De student denkt het bewijs geleverd te hebben als hij kan aantonen dat de definitie-eigenschap (6) werkt, dus dat geldt:

$$\int_{-\infty}^{\infty} -[\sin(\omega t)] / (\pi t^2) \phi(t) dt = -\phi'(0). \quad (22)$$

De integraal van (22) kan als volgt gesplitst worden in drie integralen:

$$\int_{-\infty}^{-\varepsilon} \dots + \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} \dots + \int_{\varepsilon}^{\infty} \dots \quad (23)$$

Volgens het theorema van Riemann-Lebesgue verdwijnen de eerste en de derde integraal van (23) als $\omega \rightarrow \infty$. De functie $\phi(t)$ van (22) kan ontwikkeld worden in een machtreeks. In het $(-\varepsilon, \varepsilon)$ -interval verdwijnen in de integrand van de middelste integraal van (23) alle termen met positieve machten van t als ε voldoende klein gekozen wordt. De volgende formule vat het resultaat samen.

$$\int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} -[\sin(\omega t)] / (\pi t^2) \phi(t) dt \approx$$

$$-\phi(0) \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} [\sin(\omega t)] / (\pi t^2) dt - \phi'(0) \int_{-\varepsilon}^{\varepsilon} [\sin(\omega t)] / (\pi t) dt \quad (24)$$

De eerste integraal in het rechterlid is nul omdat de integrand een oneven functie van t is. Voor de tweede integraal geldt:

$$\lim_{\omega \rightarrow \infty} -\phi'(0) \int_{-\omega\varepsilon}^{\omega\varepsilon} [\sin(x)] / (\pi x) dx \quad (25)$$

$$= -\phi'(0) \int_{-\infty}^{\infty} [\sin(x)] / (\pi x) dx = -\phi'(0)$$

Hiermee heeft de student nog een argument verzameld om te gebruiken in de discussie met zijn docent.

Een beroemd klassiek boek

Terwijl zijn docent tijd uittrekt om de fouten in de wiskundige redeneringen op te sporen, brengt zijn student wat tijd door in de bibliotheek. (Het is dus echt een denkbeeldige, ideale, eigenwijze student.) Daar vindt hij het boek "Operational Calculus" van Van der Pol en Bremmer. Op blz. 84 staat geschreven:

$$\delta^{(n)}(t) = (-1)^n n! \delta(t) / (t)^n. \quad (26)$$

Dus toch! Voor $n = 1$ staat daar precies de formule (9), die zijn docent heeft afgewezen! De docent is er echter niet van onder de indruk en merkt losjes op dat ook grootheden als Bremmer en Van der Pol zich wel eens vergissen.

Het werkt niet

Als onze student, eigenwijs en overtuigd van zijn gelijk, met formule (9) verder rekt, dan gaat het mis. Hij beredeneert dat als (9) een geldige betrekking is, ook moet gelden:

$$-(\omega)^{-1} \delta(\omega) = \delta'(\omega). \quad (27)$$

Deze gelijkheid komt van pas bij het uitwerken in zijn afstudeerscriptie van het product

$$(j\omega)^{-1} [\pi \delta(\omega) + (j\omega)^{-1}] \quad (28)$$

Dit levert op, als gebruik gemaakt wordt van (27):

$$-(\omega)^{-2} + \pi \delta(\omega) / j\omega = -(\omega)^{-2} + j\pi \delta'(\omega) \quad (29)$$

Daar blijkt niets van te kloppen als het product (28) wordt getransformeerd naar het tijddomein. Dat wordt namelijk een convolutie van de tijdfunctie $0,5 \operatorname{sgn}(t)$ en de eenheidsstapsprong $u(t)$. Die convolutie is niet te bepalen en zeker niet gelijk aan de getransformeerde van het rechterlid van (29). In de literatuur [2, 3] is namelijk te vinden dat het rechterlid van (29) de Fouriergetransformeerde is van de taludfunctie

$$x(t) = u(t) \cdot |t| \quad (30)$$

en die kan niet beschreven worden als de convolutie van $u(t)$ met $0,5 \operatorname{sgn}(t)$.

Het ziet er dus toch naar uit dat (9) en (27) onzinnige uitdrukkingen zijn waarmee je niet verder moet rekenen op straffe van onzinnige resultaten en

$$u(t) * 0,5 \operatorname{sgn}(t) = u(t) \cdot |t| \quad (31)$$

is duidelijk zo'n onzinnig resultaat.

"Dat heb ik je toch al gezegd", merkt zijn docent op. De student blijft gefrustreerd en in verwarring achter.

Het wordt tijd dat mensen, die weten hoe het zit en die precies kunnen aangeven welke denkfouten onze student heeft gemaakt, eens een studentenhandleiding gaan schrijven, die kan dienen als gids bij het betreden van dit gevaarlijke terrein. Niet alleen nuttig voor studenten in de elektrotechniek, maar ook voor hun begeleiders en de auteurs van collegedictaten en studieboeken.

Tenslotte

De argumenten, die ik in dit verhaal heb laten verzinnen door een denkbeeldige student, zijn grotendeels ontleend aan mijn bijdragen aan de plezierige correspondentie, die ik met de auteurs van [4] heb gevoerd. Ik ben deze auteurs, Van Etten, Heideman

en Brink veel dank verschuldigd voor hun belangstelling voor mijn probleem en de vele uitvoerige brieven met wetenschappelijke argumenten, die ze mij gestuurd hebben. Dank ook aan oud-collega F. van Odenhoven voor zijn niet aflatende belangstelling voor het onderwerp. Het derde voorbeeld van onze denkbeeldige student is door hem bedacht.

Referenties

- [1] R. Boute, *Transformaties en impedanties: over formeel rekenen en fysisch interpreteren*, Tijdschr. NERG, deel 65, nr 5 (2000), blz. 200-216.
- [2] A. Papoulis. "The Fourier Integral and its Applications", McGraw-Hill, 1962
- [3] R.F. Hoskins. "Generalised Functions". Ellis Horwood Limited, 1979.
- [4] G. Heideman, R. Brink en W. Van Etten, *De condensator-impedantie nader beschouwd*, Tijdschr. NERG, deel 64, nr 4 (1999), blz. 170-177.



Een vonk slaat over

Prof. dr. ir. J.C. Haartsen
Faculeit der Elektrotechniek, Universiteit Twente
j.c.haartsen@el.utwente.nl



Bijchrift redactie: Het onderstaande artikel is gebaseerd op de rede zoals die uitgesproken is door Jaap Haartsen bij de aanvaarding van het ambt van hoogleraar Mobile Radio Communicatiesystemen aan de Universiteit Twente op 17 mei 2001.

Inleiding

De informatie- en communicatietechnologie sector, afgekort ICT, staat de laatste decennia behoorlijk in de belangstelling. De snelle ontwikkelingen met name op het gebied van de micro-elektronica, openen een totaal nieuwe wereld waardoor men is gaan spreken van het informatietijdperk. De invloed van computers en moderne communicatiemiddelen op ons dagelijkse leven wordt steeds merkbaarder. Maar ook de economie in het algemeen en de beurzen in het bijzonder zijn in de ban van de I en de C.

De telecomsector heeft er de laatste vijftig jaar voor gezorgd dat grenzen verdwijnen en afstanden er niet meer toe doen. Voor de uitwisseling van gedachten en gegevens behoeven twee personen zich niet meer fysiek op dezelfde plaats te bevinden. De hoeveelheid uitgewisselde informatie en de behoefte aan meer en snellere verbindingen is de laatste jaren exponentieel gestegen. Op de vaste netwerken zijn zaken als de digitale snelweg, internet, ISDN, en ADSL gemeengoed geworden. Het mobiele netwerk heeft zo zijn eigen jargon met namen als het mobiele internet, GSM, GPRS, WAP, en Bluetooth™.

Mobile radio communicatie: *mobiel* duidt op het fenomeen dat een gebruiker overal kan communiceren waar hij maar wil, dat wil zeggen plaats onafhankelijk; *radio* duidt op het medium dat zorgt draagt voor de overdracht van de informatie; tenslotte duidt *communicatie* op de informatie uitwisseling tussen twee of meerdere gebruikers, waarbij

aangemerkt dient te worden dat gebruikers zowel personen als apparaten kunnen zijn.

Centraal in de mobiele radio communicatie staat radio. Het is met name het radiomedium waardoor radio communicatie verschilt van andere telecommunicatiemiddelen. Radio is naar mijn mening ook wat dit vakgebied zo uitdagend en interessant maakt. Radio begon met een vonk die oversloeg en ik hoop dat na deze lezing ook bij U een vonk voor het vakgebied mobiele radio communicatie over mag slaan.

Een wereld vol radiogolven

Hoewel Hertz heilig geloofde in zijn Hertziaanse golven, zag hij niet direct het belang in van zijn ontdekkingen. Op een vraag naar een mogelijke toepassing, antwoordde Hertz:

"Je hebt er totaal niets aan; het is slechts een experiment dat bewijst dat meester Maxwell gelijk had - we hebben slechts deze mysterieuze, elektromagnetische golven die we niet met het blote oog kunnen zien. Maar ze zijn er echt."

De Engelse fysicus Sir Oliver Heaviside onderkende echter het belang van de Hertziaanse golven en zei in 1891:

"Drie jaar geleden bestonden er nog geen elektromagnetische golven. Even later waren ze overal."

Echter, zelfs in de tijd van Hertz werd er nog steeds sterk getwijfeld aan het bestaan van radiogolven,

en tot aan het einde van de 19e eeuw geloofden nog velen dat magnetische inductie de oorzaak was van de stroom in Hertz zijn ontvanger. Tegenwoordig wordt het bestaan en gebruik van elektromagnetische golven in ons dagelijkse leven algemeen aanvaard. Immers het zichtbare licht is ook een elektromagnetische golf en wel eentje die we met onze menselijke zintuigen kunnen waarnemen. Toch heeft het fenomeen van draadloze informatie- en energie-overdracht, dat wil zeggen overdracht door de lucht of door vacuüm, nog altijd iets magisch. Het vak Elektrotechniek heeft op zich al iets magisch. We werken met *elektronen*, die op zichzelf niet waarneembaar zijn en waar slechts modellen van te maken zijn. Iets verder gaan nog de *gaten*, wat in feite niet-elektronen zijn. Bij elektromagnetische velden begint een menigeen zich ongemakkelijk te voelen. Draadloze communicatie grenst nog wel het dichtst aan het gebied van de paranormale verschijnselen:

- we brengen stemmen over via het luchtledige wat mijns inziens sterk aan telepathie doet denken
- we kunnen via het luchtledige apparaten activeren wat mijns inziens sterk aan telekinese doet denken

Stelt U zich een ontmoeting voor tussen een hedendaagse mobiele telefoongebruiker en een Neanderthaler en U zult begrijpen wat ik bedoel. Is het al moeilijk om de huidige jeugd op het wetenschappelijk onderwijs geïnteresseerd te krijgen in deze abstracte tak van de wetenschap, wat zeg je je kinderen als *Expert draadloze systemen* wat je dagelijks uitvoert. Een bijbaantje als professor zorgt voor enige opluchting en ontlokte bij mijn 8-jarige dochter de opmerking: "Ah professor; nou dan heb je eindelijk een baantje."

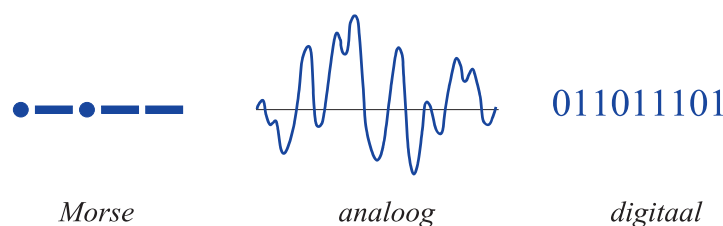
Sinds het werk van Hertz zijn onderzoekers en ingenieurs continue bezig met het ontwikkelen en optimaliseren van generatoren en detectoren voor radiogolven, namelijk de radiozenders en ont-

vangers. Ook het gebied van signaal- en informatiecodering geschikt voor radiotransmissie is nog volop in beweging. In eerste instantie werd voor de codering de techniek van Morse gebruikt, in 1834 geïntroduceerd voor transmissie over de telegraaflijnen. Morsecodering is in feite een digitale techniek bestaande uit een alfabet van punten, strepen, en pauzes; ons allen is wel bekend de code punt-punt-punt, streep-streep-streep, punt-punt-punt wat staat voor SOS of te wel *Save Our Souls*. De beperkte Morsecodering maakte het slechts mogelijk berichten te verzenden.

Toen radiocircuits verder verfijnd werden, werd het mogelijk analoge technieken toe te passen. De Canadees Reginald A. Fessenden (1866-1932) demonstreerde in 1905 overdracht van spraak via radio over een draaggolf van 50 kHz. Hiermee werd de wereld van de telefonie ook in de draadloze communicatie geïntroduceerd. Het verzenden van analoge informatie, dus spraak, muziek en beeld, kan gezien worden als een doorbraak in de communicatie historie, zowel voor de vaste communicatie over kabels in 1876 geïntroduceerd door Graham Bell (1847-1922), als voor de draadloze communicatie in 1905 geïntroduceerd door Fessenden. Grootschalige toepassingen zoals de commerciële radio en TV omroep, en de telefonie kwamen pas in zicht met de overdracht van analoge informatie. Het kostte de wetenschap ongeveer 80 jaar om weer terug te komen op het Morse concept nu met enen en nullen in plaats van punten en strepen. Het computer tijdperk, ingeleid door de transistor en de geïntegreerde circuits, gaf een nieuwe impuls aan de digitale techniek en leidde uiteindelijk tot de revolutie in de digitale radio communicatie, waarover straks meer.

Voor het meer inzicht verkrijgen over welke toepassingen met radio allemaal mogelijk zijn, is het van belang allereerst het soort verbindingen te bekijken. We kunnen radioverbindingen verdelen in:

Figuur 6. Signaalcoderingstechnieken door de jaren heen.



- punt naar punt
- punt naar multipunt
- multipunt naar multipunt

waarbij nog een onderscheid dient te worden gemaakt tussen verbindingen die één- of tweerichtingsverkeer toelaten.

Punt-naar-punt verbindingen

De allereerste toepassing van radio was het leggen van radioverbindingen tussen twee punten waar kabelverbindingen onmogelijk of economisch niet haalbaar waren. Hoewel reeds rond 1860 onderzeese kabels in de transatlantische oceaan communicatie tussen Europa en Amerika mogelijk maakten, liet zowel de kwaliteit als de betrouwbaarheid nogal te wensen over. Het gebruik van radio communicatie voor transatlantische verbindingen, zoals aangetoond door Marconi in 1901, werd dan ook als een zeer bruikbare toepassing van deze nieuwe, op vonken gebaseerde techniek gezien. Ook vandaag de dag wordt radio intensief voor straalverbindingen gebruikt voor het overbruggen van grote afstanden. Radioverbindingen tussen satellieten en grondstations vormen een wereldwijd netwerk voor het telefonie- en internetverkeer.

Vervolgens kunnen vaste radioverbindingen een goedkopere oplossing zijn in gebieden waar nog geen kabels of glasvezels aanwezig zijn zoals in ontwikkelingslanden. Lucht kost immers niets. Hierbij dient opgemerkt te worden dat dit type verbindingen weinig tot niets met *mobiele* radio communicatie te maken heeft daar zender en ontvanger meestal vast staan opgesteld.

Punt-naar-multipunt verbindingen

Bij dit type verbindingen bereikt een enkele radiozender een aantal tot zeer groot aantal radio-ontvangers. Reeds in 1908 installeerde de Amerikaan Lee de Forest (1873-1961) een radio zender op de Eiffeltoren en zond muziek uit afkomstig van een grammofoon over een gebied met een straal van 800 km. Helaas waren er te weinig radio-ontvangers om deze toepassing populair te maken. De commerciële vonk sloeg pas 20 jaar later over met de introductie van de radio- en televisie-omroepen die beeld en geluid via radiogolven vanuit de studio's bij ons in de huiskamers brachten. Het Duitse woord "Rundfunk" ter aanduiding van de radio-omroep herinnert nog altijd aan de Hertziaanse vonken. De radio-omroep werd geïntroduceerd tussen de twee wereldoorlogen, terwijl



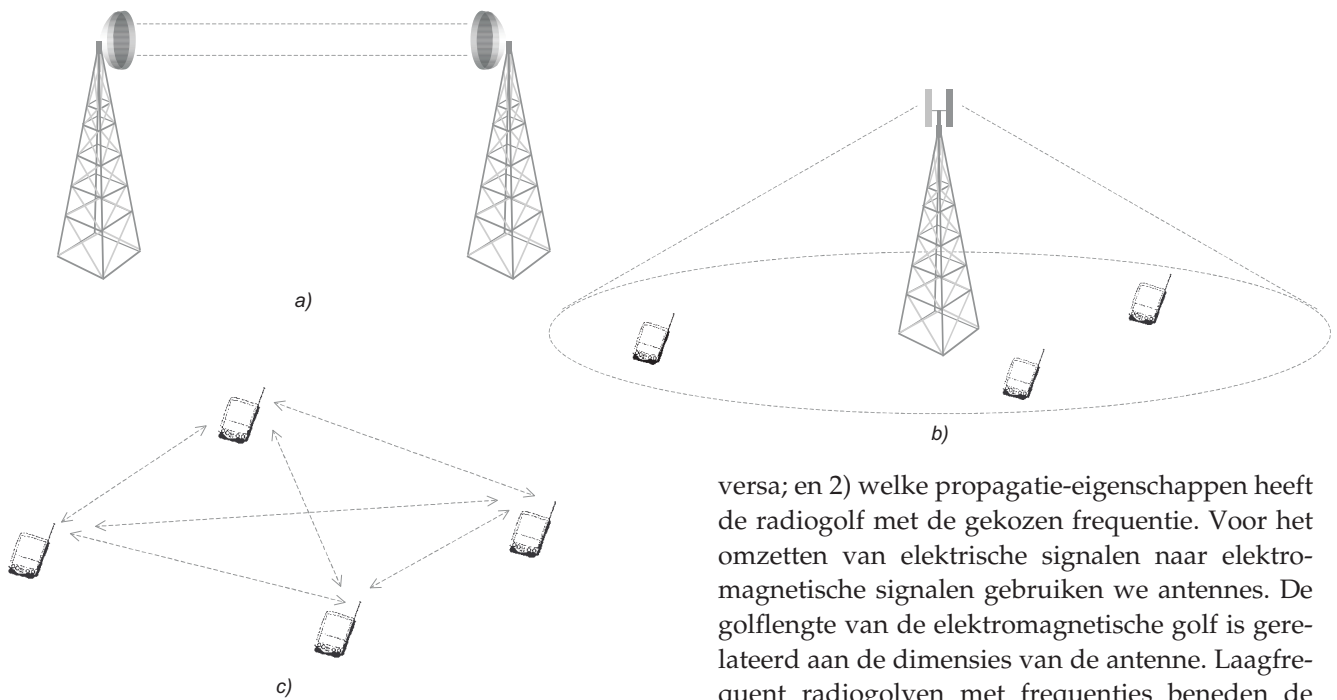
Figuur 7. TV- en radiozender van 100kW nabij IJsselstein.

televisie direct na de tweede wereldoorlog een geweldige groei doormaakte. Krachtige zenders strategisch geplaatst in het land maakten individuele bekabeling naar ieder huishouden overbodig.

Inmiddels hebben wijdvertakte netwerken van kabels en glasvezels in de ontwikkelde landen de radiotoepassingen voor radio- en TV-omroep achterhaald. Echter, met het gebruik van de transistor- en autoradio zien we nog steeds een toepassing voor de mobiele radio-omroep. Hier vormt kabel of vezel geen alternatief. Naast lange-afstandsoverbrugging werd ook mobiliteit reeds als primaire toepassing gezien in de tijd van Marconi. Het was vooral de marine die sterk geïnteresseerd was in radio communicatie voor het onderhouden van contacten tussen schepen op zee en basisstations op het vaste land. De marifoon is nog steeds operationeel. Ook het huidige, landelijk-dekkende mobiele telefonie systeem is gebaseerd op een punt-naar-multipunt verbinding, met een centraal-opgestelde vaste zendontvanger, het basisstation, en vele mobiele telefoons. Hierover straks meer.

Multipunt-naar-multipunt verbindingen

Bij multipunt-naar-multipunt verbindingen kunnen zenders en ontvangers willekeurig onderling contact maken. Radiotoepassingen vinden we bij directe communicatie tussen voertuigen zoals schepen en vliegtuigen, maar ook bij dienstverleners in de publieke sector zoals politie, brandweer, en ambulance. Natuurlijk vindt dit type verbinding



Figuur 8. Radioverbindingen gebaseerd op a) punt-naar-punt, b) punt-naar-multipunt, en c) multipunt-naar-multipunt.

zijn toepassingen in de militaire sector voor het onderhouden van contact tussen voertuigen en personen. Een commerciële toepassing vinden we in Bluetooth. Bij multipunt-naar-multipunt verbindingen kunnen alle zendontvangers mobiel zijn.

Het radiospectrum wordt duur betaald

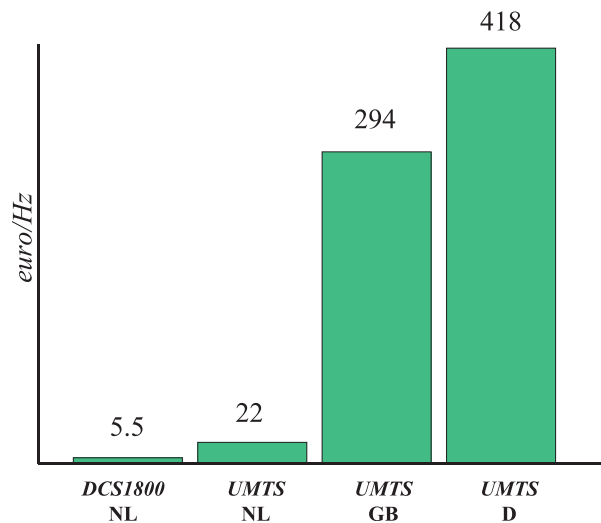
Voor de transmissie van radiogolven is geen geleidend medium nodig. Radiogolven planten zich door de lucht voort, zelfs door vacuüm. Lucht kost niets dus vormt radiotransmissie een goedkope vorm van informatie-overdracht. Helaas, de realiteit is anders zoals U de laatste jaren wel heeft kunnen volgen in de media. Radiospectrum is een schaarse hulpbron en daardoor onderhevig aan economische invloeden.

Het elektromagnetisch frequentiespectrum maakt gebruik van de eenheid Hertz die het aantal cycli per seconde aanduidt. Het spectrum strekt zich uit vanaf 0 Hz, ook wel DC of *Direct Current* genoemd, tot in het oneindige. Waarom schaars zult U nu zeggen? Voor een keuze van een frequentieband voor radio communicatie zijn twee zaken van essentieel belang: 1) hoe zetten we het elektrische informatiedragende signaal om in een elektromagnetische golf met de gekozen frequentie en vice

versa; en 2) welke propagatie-eigenschappen heeft de radiogolf met de gekozen frequentie. Voor het omzetten van elektrische signalen naar elektromagnetische signalen gebruiken we antennes. De golflengte van de elektromagnetische golf is gerelateerd aan de dimensies van de antenne. Laagfrequent radiogolven met frequenties beneden de 1 MHz hebben een groot bereik en trekking zich weinig van obstakels aan. Echter, vanwege de grote golflengte van de radiogolf kunnen antenne-afmetingen een probleem vormen. Een 1 MHz radiogolf heeft een golflengte van 300 meter en de benodigde zendantenne een afmeting van rond de 75 meter. U kunt zich voorstellen dat antennes van deze afmetingen en daarmee laagfrequent radiogolven minder geschikt zijn voor toepassingen in mobiele telefoons. Hoogfrequent radiogolven met frequenties rond de 1 GHz hebben een kleiner bereik, en worden meer geblokkeerd en gereflecteerd door obstakels. Daarentegen zijn de antenne-afmetingen vrij klein vanwege de kleine golflengte van de hoogfrequent golf. Super-hoogfrequent radiogolven boven de 10 GHz zijn zeer richtings specifiek, laten richtantennes met grote versterkingen toe en zijn uitermate geschikt voor punt-naar-punt straalverbindingen bijvoorbeeld naar satellieten. Vijf orde groottes hoger in het frequentiebereik doen ons belanden in het spectrum van infrarood, zichtbaar, en ultraviolet licht wat zijn toepassing in de optische communicatie vindt. Gegeven de praktische afmetingen van antennes en de propagatie-eigenschappen op het aardoppervlak, zijn radiogolven met frequenties tussen 500 MHz en 5 GHz het meest geschikt voor mobiele radio communicatie. Dit is een band van 4500 MHz. Met recht kan dus van een schaarse hulpbron gesproken worden, vooral als we spreken van toekomstige diensten die datasnelheden in de honderden megabits per seconde beloven.

De noodzaak voor het gecontroleerd toewijzen van radiospectrum voor de verschillende toepassingen werd reeds in de begintijd van de radio onderkend. Omdat radiogolven zich niets aantrekken van landsgrenzen, is een internationale samenwerking vereist. De tweejaarlijkse *World Radiocommunications Conference* (WRC) dient als forum voor het toewijzen van radiofrequenties voor verschillende toepassingen en het bepalen van toekomstige technologische ontwikkelingen. Samenwerking op wereldschaal garandeert een uniform gebruik van het radiospectrum ongeacht de locatie.

Lokale overheden kunnen echter zelf bepalen hoe ze het radiospectrum verdelen onder belanghebbenden zoals de telecomaandieners. Dit gebeurt door middel van vergunningen, een idee dat in 1904 geïntroduceerd werd in Engeland in *The Wireless Act*. Die bepaalde dat alle radiostations een vergunning moesten hebben voor radiotransmissie en ontvangst, en zelfs voor het kunnen aanschaffen van onderdelen voor de zendontvangers. Aanleiding was de angst van de Post Office voor concurrentie voor de communicatie over de kabel, een gebied waar de Post Office een monopolie positie bezat. Het verlenen van vergunningen voor het gebruik van het radiospectrum legt de lokale overheden geen windeieren getuige de opbrengsten van de veilingen voor frequenties voor mobiele telefonie in de afgelopen jaren. Dat radiospectrum ook aan inflatie onderhevig is, blijkt uit het feit dat in februari 1998 in Nederland tijdens de veiling van de DCS1800 (*Digital Cellular radio System*) frequenties nog 5.5 euro per Hz betaald werd, terwijl in de zomer 2000 voor de UMTS (*Universal Mobile Telephone System*) frequenties al 22 euro per Hz werd betaald. In omliggende landen zoals in Engeland en Duitsland waren de bedragen respectievelijk 294 en 418 euro. Bij deze bedragen, die voor bandbreedtes van tientallen MHz oplopen tot miljarden euro's, moet natuurlijk rekening worden gehouden met de inwoneraantallen (de uiteindelijk betalende gebruikers) en het te verwachten gebruik voor draadloze telefonie en dataverkeer. Echter, gezien het feit dat dit radiospectrum de basis vormt voor de digitale snelweg, maar dan draadloos, en de licenties het alleenrecht op deze snelweg geven, zie ik nog steeds een zonnige toekomst voor de mobiele telefoonaandieners die de licenties bemachtigd hebben. Het blijft natuurlijk een uitdaging de gedane investeringen terug te verdienen.



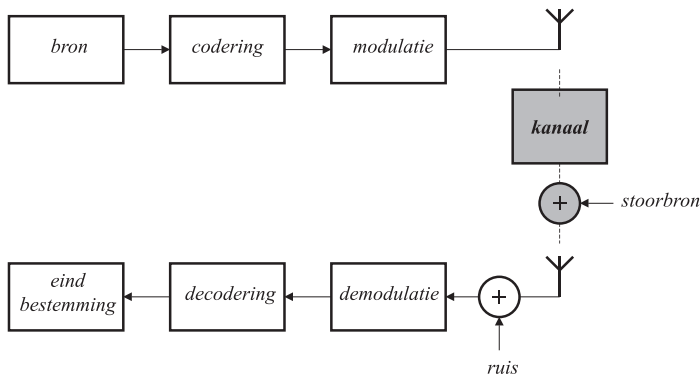
Figuur 9. Licentiekosten in euro/Hz voor de DCS1800 (voorjaar 1998) en de UMTS frequenties (zomer 2000) in Nederland en omliggende landen.

Hoewel alle frequenties van 500 MHz tot 5 GHz verdeeld zijn volgens internationaal opgestelde regels, zijn niet voor alle frequenties vergunningen vereist. Bepaalde frequentiebanden zijn vergunningsvrij, maar laten slechts één bepaald type radio systeem toe. Een voorbeeld daarvan is de DECT (*Digitally Enhanced Cordless Telephone system*) band in Europa die een gebied van 1880 tot 1900 MHz bestrijkt. Deze band wordt voornamelijk gebruikt voor draadloze telefonie binnenshuis. De gereserveerde band laat slechts DECT radio's toe en kan dus niet voor mobiele telefoniesystemen zoals GSM (*Global System for Mobile communications*) of UMTS gebruikt worden.

Naast de vergunningsvrije maar gereserveerde banden bestaan er vergunningsvrije en niet-gereserveerde banden. Een typisch voorbeeld is de ISM (*Industrial-Scientific-Medical*) band van 2400 tot 2483.5 MHz. Van deze band kan elk radio systeem gebruik maken mits voldaan wordt aan zekere vermogensrestricties en signaalspreidingsregels. Dit om een eerlijk gebruik voor elke willekeurig radio-gebruiker mogelijk te maken. In deze band werkt bijvoorbeeld het Bluetooth systeem waarover straks meer.

Mobiele radio communicatie

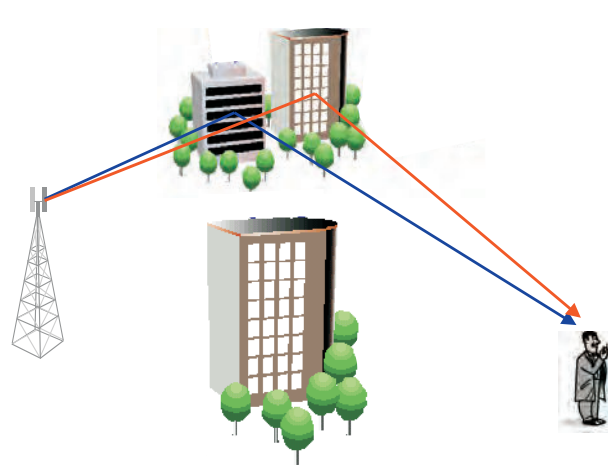
Dan zijn we nu aangeland bij de kern van deze rede, namelijk de mobiele radio communicatie. Communicatie is het overbrengen van informatie van een bron naar een eindbestemming. Aan de zenzijde worden berichten genereerd in een



Figuur 10. Schematische weergave van een communicatieketen.

informatiebron. Deze worden vervolgens gecodeerd enerzijds om redundantie te verwijderen en anderzijds om redundantie toe te voegen zodat fouten aan de ontvangtzijde gecorrigeerd kunnen worden. De gecodeerde signalen worden dan gemoduleerd voor een efficiënte overdracht over het kanaal, en tenslotte verzonden. Aan de ontvangtzijde gebeurt precies het tegenovergestelde: het signaal wordt gedemoduleerd, gedecodeerd, en bereikt tenslotte de bestemming. Tot zover een algemene communicatie keten die geldt voor een willekeurig verbinding van een telefoonlijn tot een glasvezel.

Wat een mobiele radioverbinding zo speciaal maakt is het kanaal tussen de zender en de ontvanger. Ten eerste varieert de positie van de ontvanger relatief ten opzichte van de zender over de tijd. De variaties in het ontvangen signaal worden bepaald door de Dopplerspreiding en hangen af van zowel de draaggolffrequentie als van de relatieve snelheid tussen de zender en de ontvanger. Voor een mobiele telefoongebruiker rijdend in een auto met een snelheid van 100 km per uur verandert het propagatiekanaal binnen enkele milliseconden. Ten tweede spreken we bij het radiokanaal van een *niet-geleidend* medium, wat wil zeggen dat de signaaluitbreiding niet begrensd wordt. Radiogolven kunnen zich in alle richtingen uitbreiden. Dit heeft tot gevolg dat het signaal opgepikt door de ontvanger aanmerkelijk verzwakt is. Verder kan dit tot gevolg hebben dat het uitgezonden signaal de ontvanger via meerdere paden bereikt. Bij kleine padlengteverschillen leidt dit tot abrupte signaalverzwakking daar twee radiogolven in tegenfase elkaar uitdoven; bij grotere padlengteverschillen vinden er verstoringen plaats tussen opeenvolgende symbolen.



Figuur 11. Multi-pad kanaal waarbij het uitgezonden kanaal de ontvanger via verschillende paden bereikt.

Maar een groter probleem bij het niet-geleidende medium is dat signalen, uitgezonden door verschillende zenders, ontvangen worden door dezelfde ontvanger, waardoor het gewenste signaal ernstig verstoord kan worden. Dit probleem werd reeds in de beginjaren van het radiotijdperk onderkend. Zoals een officier van de Britse marine het rond 1900 verwoordde:

"Wanneer één transmitter zendt is er niets aan de hand. Wanneer twee transmitters gelijktijdig zenden op hetzelfde moment, vangen alle ontvangers binnen bereik gelijktijdig beide signalen op. Geen van beiden zijn te ontcijferen. Hoe denkt U dit te verhelpen, meneer Marconi?"

De specifieke eigenschappen van het radiokanaal stellen specifieke eisen aan het ontwerp van een mobiel radio communicatiesysteem. Maar naast het radiokanaal zijn er meerdere karakteristieke eigenschappen waarvan ik er hier nog twee wil noemen. Behalve dat een mobiele gebruiker geen kabelverbinding heeft met het vaste communicatienetwerk, zal hij ook geen snoerverbinding hebben met het elektriciteitsnetwerk. Mobiele gebruikers hebben draagbare apparaten gevoed door accu's of batterijen. Het gevolg is dat er in een mobiel radiosysteem voorzichtig om gesprongen dient te worden met het stroomverbruik in de zendontvangers. Natuurlijk is ook het werk aan accu's en batterijen van cruciaal belang voor de mobiele radio communicatie, maar daarop zal ik in deze rede niet verder ingaan. Draagbaar betekent ook lichtgewicht en kleine afmetingen. Het is niet verwonderlijk dat de vergaande miniaturisering en integratie van elektronische schakelingen juist zijn

toepassing gevonden heeft in de mobiele radio communicatiesector.

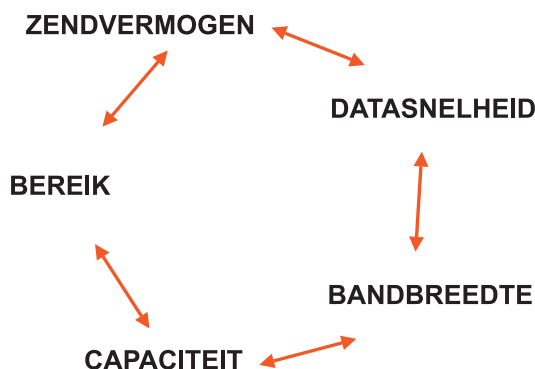
De laatste tijd staat de mobiele communicatie sterk in de belangstelling. Kranten staan vol met cryptische afkortingen en omschrijvingen als UMTS, WAP, GPRS, Bluetooth. We ontvangen al jaren muziek en praatprogramma's uit Hilversum via onze AM/FM radio's, zelfs mobiel als we onze autoradio aanzetten. Waarom niet één enkel radiosysteem dat voor elke toepassing gebruikt kan worden? Ik kan u met blijdschap mededelen dat dit niet mogelijk is, anders zou mijn rol als onderzoeker op het gebied van mobiele radio communicatiesystemen binnenkort uitgespeeld zijn. Voor een mobiel radio communicatiesysteem zijn er vijf cruciale parameters, en wel

- bereik d (meters)
- zendvermogen P_{tx} (Watts)
- datasnelheid R_b (bits/seconde)
- bandbreedte W (Hertz)
- capaciteit C (bits/seconde/Hertz/m²)

Aan dit rijtje zouden nog kostprijs en/of complexiteit toegevoegd kunnen worden, maar door de voortschrijdende technologische ontwikkelingen met name in de elektronica-sector, worden deze parameters over de jaren alsnog van minder belang. Een ideaal systeem, wat inderdaad voor elke toepassing ingezet zou kunnen worden, zou de volgende eigenschappen hebben:

- bereik oneindig
- zendvermogen nul
- data snelheid oneindig
- bandbreedte nul
- capaciteit oneindig

Figuur 12. De vijf parameters die een cruciale rol spelen bij het ontwerp van een radio systeem

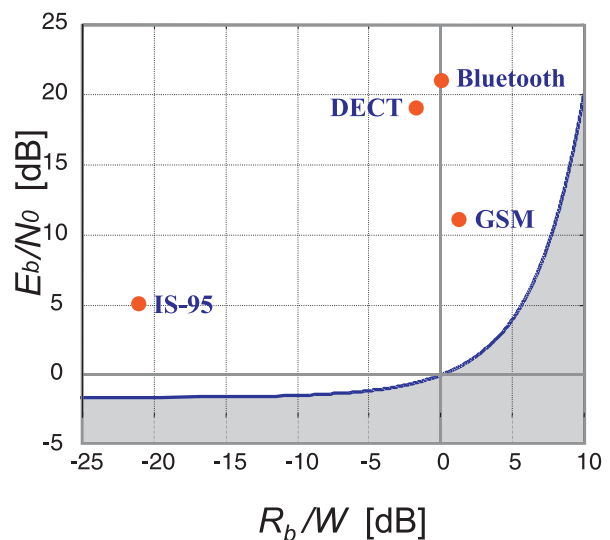


Helaas is zo'n systeem praktisch niet realiseerbaar. Fysische grenzen dwingen ons tot het maken van compromissen. Elke toepassing stelt zijn eigen eisen aan deze compromissen hetgeen leidt tot een groot aantal verschillende radio communicatiesystemen.

Bereik, zendvermogen, datasnelheid en bandbreedte zijn direct met elkaar verbonden via het theorema van Shannon-Hartley. Dit theorema legt een bovengrens aan de datasnelheid R_b in bits per seconde voor een foutloos kanaal waar verstoring alleen optreedt als gevolg van additieve, witte, Gaussische ruis:

$$R_b = W \log_2(1 + SNR)$$

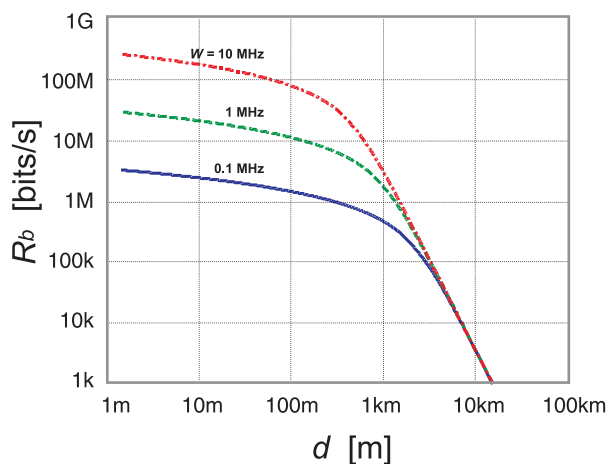
waarbij W de bandbreedte (Hz) van het kanaal is en SNR de signaalruisverhouding aan de ontvangtzijde. In de signaalruisverhouding komt de energie E_b per ontvangen bit terug, die direct gerelateerd is aan het zendvermogen en het bereik. Figuur 13 illustreert de relatie tussen de datasnelheid R_b , de benodigde bandbreedte W , en de benodigde energie per bit E_b voor een foutloze overdracht. Omdat in de praktijk zowel bandbreedte als zendvermogen begrensd zijn, zal U duidelijk zijn dat er altijd een afweging gemaakt moet worden tussen bereik en datasnelheid.



Figuur 13. Afweging tussen de ontvangen bitenergie E_b , de datasnelheid R_b en de bandbreedte W .

Figuur 14 vertoont de relatie tussen de theoretisch maximaal haalbare datasnelheid en het theoretisch maximaal haalbare bereik met de beschikbare bandbreedte als parameter. Er is uitgegaan van een

100mW zendvermogen en een signaalverzwakking van 30dB per decade over het radiokanaal. Om de curven meer naar rechtsboven te krijgen, dus meer datasnelheid met meer bereik, moet men ofwel de bandbreedte vergroten, hetgeen alleen helpt voor afstanden beneden de 200 m, of proberen de energie per ontvangen bit te vergroten. Bandbreedte vergroting kan ten koste gaan van de capaciteit en stuit op implementatieproblemen, dat wil zeggen vereist meer stroomverbruik in de zender-ontvanger. De energie per bit is te verhogen door ofwel het zendvermogen te vergroten wat niet wenselijk is, of door de verzwakking over het kanaal te verkleinen. Dit laatste betekent dat het zendvermogen meer geconcentreerd moet worden in de richting van de ontvanger; te veel energie gaat verloren doordat het uitgezonden signaal zich ongelimiteerd uitbreidt en nooit de ontvanger bereikt. Hiernaar wordt momenteel veel onderzoek verricht onder andere op het gebied van adaptieve antennes met grote richtingsgevoeligheid, en array antennes in zogenaamde *Multi-Input Multi-Output* (MIMO) systemen.



Figuur 14. Afweging tussen het bereik d , en de datasnelheid R_b .

Uit het voorgaande mag duidelijk zijn dat draadloze communicatie zijn grenzen kent. Vandaag de dag wordt er veelvuldig gesproken over breedbandige toepassingen, maar breedband is een relatief begrip. Waar op het vaste net al gesproken wordt over datasnelheden van gigabits per seconde en zelfs terabits per seconde, is in de draadloze wereld 10 megabits per seconde al een hele prestatie. De draadloze verbinding zal het wat betreft datasnelheid altijd afleggen tegen de vaste verbinding. Radio wordt dan ook voornamelijk gebruikt daar waar kabels de bewegingsvrijheid

van de gebruiker beperken, en bovendien het aantal gebruikers per radioverbinding klein is. Of te wel de laatste schakel tussen het wereldwijde, supersnelle vaste netwerk, en de mobiele gebruiker.

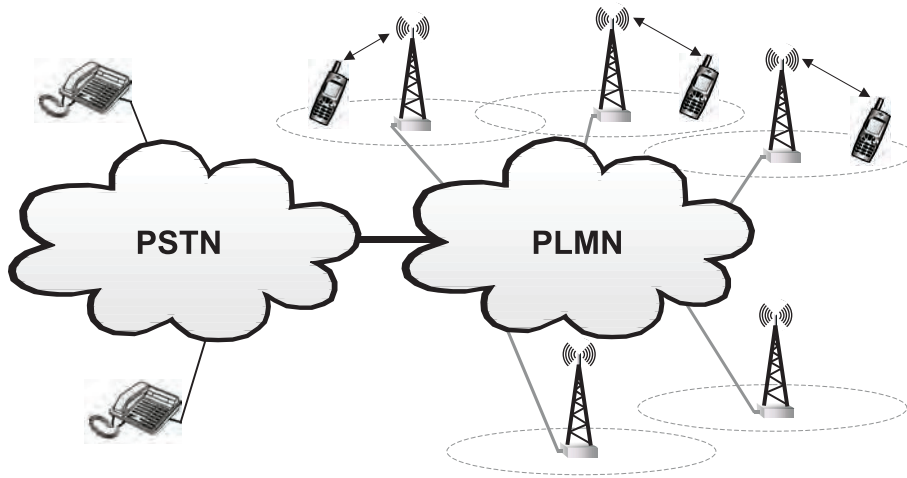
Bereik heeft direct te maken met mobiliteit: hoe lang houdt een ontvanger verbinding met de zender. Een gebruikelijke classificatie van mobiele radiosystemen is naar datasnelheid en mobiliteit. In figuur 14 zouden draadloze systemen met beperkte mobiliteit voor gebruik in huis en op kantoor zoals DECT en WLAN (*Wireless Local Area Networks*) systemen linksboven belanden, terwijl mobiele telefoonsystemen die landelijke dekking geven zoals GSM en UMTS rechtsonderaan zouden belanden. Ik wil hier echter een andere classificatie maken. Deze classificatie richt zich niet op mobiliteit en datasnelheid, maar op de relatie tussen de radioverbinding en het vaste netwerk. De drie radiosystemen die ik wil onderscheiden zijn

- Mobiele systemen
- Draadloze extensies
- Ad-hoc systemen

Mobiele systemen

Bij systemen behorende tot de klasse van mobiele systemen is er een duidelijk onderscheid tussen het conventionele vaste netwerk enerzijds en het mobiele netwerk anderzijds. Dit type systemen vindt zijn toepassing in de publieke mobiele telefonie die de laatste tien jaar een geweldige opmars gemaakt heeft. Ik schat dat één op de drie Nederlanders nu wel een mobiele telefoon heeft. Met de mobiele telefoon kun je bijna vanuit elk locatie in Nederland toegang tot het vaste telefoonnet krijgen. Het systeem maakt daarmee de publieke telefooncel overbodig. Het mobiele netwerk bestaat uit een infrastructuur van een groot aantal vaste basisstations die onderling verbonden zijn door middel van een netwerk van kabels of vezels: *het publieke land mobiele netwerk*. De radioverbinding tussen de mobiele telefoon en het basisstation is de laatste schakel in een keten die hoofdzakelijk uit koper of glasvezel bestaat.

Hoe verschilt nu dit concept met het radio-omroepstelsel bestaande uit een zendstation in Hilversum en verschillende steunzenders elders in het land? De eerste mobiele systemen waren in feite gebaseerd op dit omroepprincipe.



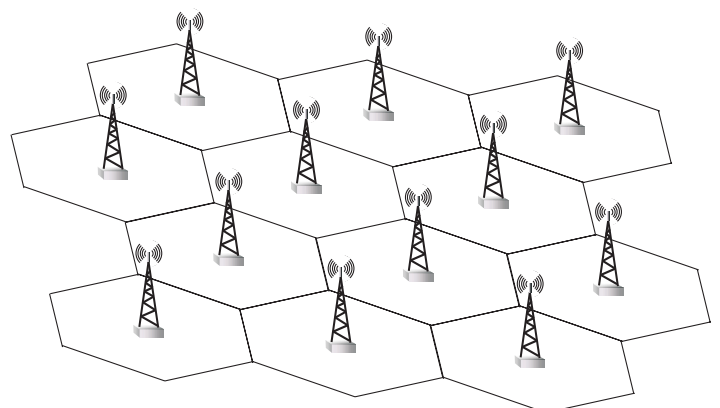
Figuur 15. Voorbeeld van een mobiel systeem met het publieke land mobiele netwerk (PLMN) strikt gescheiden van het publieke telefoonnet (PSTN).

In 1921 gebruikte de politie in Detroit een centraal opgestelde zender met ontvangers in politieauto's om zo agenten snel naar de plaats van een ongeluk of misdrijf te kunnen dirigeren. Echter, zowel dit politiesysteem als het radio-omroepsysteem is gebaseerd op éénrichtingsverkeer: informatie wordt van het zendstation naar de ontvangers verzonden. Om een redelijk gebied te bedekken worden kilowattzenders gebruikt, wat voor de vaste zendstations geen problemen oplevert. Anders wordt het als een tweewegsverbinding gewenst is, zoals in de mobiele radio communicatie gebruikelijk is. Omdat een kilowattzender niet praktisch is voor een mobiele zendontvanger, waarbij immers kleine afmetingen, een laag gewicht, en een laag stroomverbruik van essentieel belang zijn, moet de afstand tussen het vaste basisstation en de mobiele gebruiker beperkt blijven. Voor een dekking van een groter gebied betekent dit, dat meer basisstation geïnstalleerd moeten worden. Elk basisstation beheert zijn eigen deelgebied ook wel *cel* genaamd. Op deze manier ontstaat er dus een cellulair netwerk. De basisstations zijn onderling verbonden, en terwijl een mobiele gebruiker zich door het cellulaire gebied beweegt, wordt de radioverbinding doorgegeven van het ene basisstation naar het volgende basisstation.

Om storingen tussen nabijgelegen basisstations te verhinderen, moet elk basisstation zijn eigen kanaal hebben. In eerste instantie werden kanalen gedefinieerd door het beschikbare frequentiespectrum op te delen in smalle frequentiebandjes waarbij ieder bandje een apart kanaal representeerde en elke cel zijn eigen frequentiebandje kreeg. Het nadeel van deze methode is dat men snel door

de beschikbare kanalen heen is, vooral bij een gebied van redelijk grootte en een redelijk aantal gebruikers. Hetzelfde frequentiebandje gebruiken in verschillende zenders stuitte op problemen van onderlinge storingen tussen de zenders. Het beperkte spectrum en de daardoor beperkte capaciteit vormde een ernstig obstakel voor een groot-schalig gebruik van mobiele radio communicatie. Een doorbraak kwam pas in de jaren vijftig toen binnen Bell labs het principe van *frequentie-hergebruik* ontdekt werd. Niet het absolute vermogen van een stoorbron is van belang, maar de verhouding tussen het stoorvermogen en het vermogen van het gewenste signaal. Dit betekent dat als de geografische afstand tot de gewenste zender voldoende kleiner is dan de afstand tot de stoorzender, de twee zenders toch hetzelfde kanaal kunnen gebruiken zonder elkaar nadelig te beïnvloeden. Hergebruik van kanalen op geografisch gescheiden locaties betekent dat een ongelimiteerd aantal mobiele gebruikers bediend kan worden met een beperkt spectrum. Dit was de

Figuur 16. Een cellulair netwerk voor landelijke dekking met beperkt zendvermogen en beperkt frequentiespectrum.



vonk die zorgde voor de explosieve groei van mobiele telefonie in de jaren zeventig en tachtig.

De vooruitgang in de mobiele telefonie wordt gekenmerkt door generaties die elkaar opvolgen met een interval van ongeveer tien jaar. De eerste generatie, operationeel in de jaren tachtig, bestond uit systemen gebruik makend van analoge technieken zoals AMPS (*Advanced Mobile Phone System*) in de VS, en NMT (*Nordic Mobile Telephone*) en ETACS (*Extended Total Access Communication System*) in Europa. Mobiele telefonie werd pas echt toegankelijk voor het grote publiek begin jaren negentig toen digitale technieken toegepast werden en de tweede generatie geboren werd. De digitale technologie bracht niet alleen een sterke daling in de kostprijs van mobiele telefoons: de nu toepasbare digitale signaalbewerking leverde sterke verbeteringen op voor wat betreft spraak-kwaliteit, beveiliging, en spectrale capaciteit. Lag bij de eerste generatie mobiele netwerken de nadruk geheel op bereik en dekking met een zo'n klein mogelijk aantal basisstations hetgeen vooral neerkwam op het onderdrukken van ruis, bij de tweede generatie ging het om het vergroten van de capaciteit wat neerkwam op het onderdrukken van storingen. Multi-user detectie, interferentie suppressie, en meer van dat soort geavanceerde algoritmes vergrootten de capaciteit en waren niet mogelijk geweest zonder digitale signaalbewerking. Een typisch tweede generatie system is het GSM systeem dat gestandaardiseerd werd in Europa en thans op uitgebreide schaal overal ter wereld wordt toegepast.

De eerste twee generaties mobiele systemen hebben zich voornamelijk geconcentreerd op spraakverkeer. Bij de volgende generatie, de derde generatie, zal het dataverkeer een even zo grote, zo niet grotere rol gaan spelen. Daarbij vindt een verschuiving plaats van circuit-geschakelde verbindingen waarbij elke gebruiker een gereserveerd kanaal toegewezen krijgt, naar pakket-geschakelde verbindingen waarbij een groot aantal gebruikers hetzelfde kanaal delen. Vooral voor dataverkeer, wat een vrij onregelmatig gebruik van het kanaal vereist, zijn pakket-geschakelde verbindingen veel efficiënter. Het GPRS (*General Packet Radio Services*) systeem brengt dit pakket-geschakelde principe binnen GSM, en zal verder uitgebreid worden binnen het derde generatie mobiele telefonie systeem UMTS. UMTS laat een veel flexibeler radioprotocol toe waarmee ook hogere datasnelheden

bereikt kunnen worden. Spraak en datadiensten zullen naadloos in elkaar overgaan. Behalve telefonie zullen ook internetdiensten aan de mobiele gebruiker aangeboden kunnen worden. Dit opent een totaal nieuwe wereld van mogelijkheden op het gebied van bijvoorbeeld het mobiele internet en m-commerce waarbij een interactie plaatsvindt tussen de mobiele gebruiker op locatie en gebruikers of dienstverleners elders.

Bij radiosystemen behorend tot de klasse van de mobiele systemen zorgt de mobiele infrastructuur voor alle activiteiten op het radiogebied. De intelligentie bevindt zich in schakelcentrales die zorgen voor de configuratie van de radioverbindingen tussen basisstations en mobiele apparaten, zorgen voor de juiste verkeerstromen tussen de basisstations, en zorgen voor de interface naar het vaste netwerk. De basisstations en de mobiele apparaten worden geheel gecontroleerd door dit mobiele netwerk. Coördinatie van frequentie-allocatie in verschillende cellen garandeert frequentie-hergebruik met minimale storingen tussen de kanalen. De frequenties waarmee gewerkt wordt zijn speciaal gereserveerd voor mobiele communicatiediensten, en worden in licentie geëxploiteerd door de teleco-manbieders.



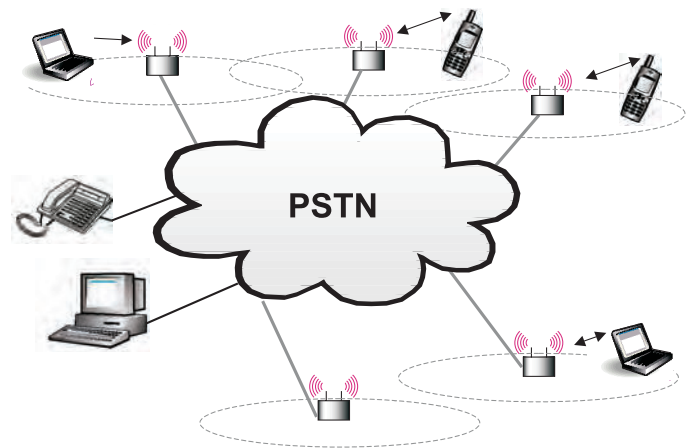
Figuur 17. Naast spraak zullen mobiele internetdiensten een belangrijke service voor de derde generatie mobiele systemen worden.

Ik hoop dat U na deze uiteenzetting van mobiele netwerken niet de conceptuele fout zult maken die ik onlangs van een kennis vernam. Hij bleek met zijn mobiele telefoon een internationaal gesprek gevoerd te hebben met zijn tante in Australië die ook over een mobiele telefoon beschikte. Hij stond versted dat zijn mobiele telefoon met het beperkte zendvermogen in direct contact kon staan met de

mobiele telefoon van zijn tante over een afstand van vele duizenden kilometers. Het feit dat de verbinding voor meer dan 90% over kabels verliep was niet tot hem doorgedrongen.

Draadloze extensies

Systemen gebaseerd op draadloze extensies geven een draadloze toegang tot een reeds bestaand vast netwerk. Een voorbeeld is uw draadloze telefoon thuis die direct op de aansluiting van uw vaste telefoon aangesloten wordt. Een ander voorbeeld is een draadloze LAN (*Local Area Network*), waarbij de kabelverbinding van het Ethernet naar uw personal computer of laptop vervangen is door een radioverbinding. Dit systeem bestaat dus uit een vast net uitgebreid met een aantal basisstations die de radioverbinding naar de mobiele apparaten verzorgen. Het grote verschil met het zojuist besproken mobiele systeem is de afwezigheid van een mobiel netwerk dat specifiek de radiofuncties controleert en coördineert. Bij de draadloze extensie zijn de basisstations autonome eenheden die zorgdragen voor de configuratie van de radioverbindingen, en zorgen voor de interface naar het vaste netwerk. Coördinatie tussen basisstations is niet of nauwelijks aanwezig. Voorbeelden van draadloze extensiesystemen zijn DECT dat een extensie vormt voor het vaste publieke telefoonnet, maar ook de draadloze LANs zoals WLAN 802.11 wat als een extensie van het vaste Ethernet kan worden gezien, en HIPERLAN2 (*High Performance Local Area Network*) wat in eerste instantie als een extensie van het vaste ATM (*Asynchronous Transfer Mode*) netwerk begon. Bij draadloze extensies is het de bedoeling dat een vaste aansluiting direct vervangen kan worden door enerzijds een basisstation gekoppeld aan het netwerk, en anderzijds een zendontvanger ofwel ingebouwd ofwel toegevoegd in de vorm van een insteekkaart in het mobiele apparaat. Omdat het gebruik van de radiofrequenties niet centraal gecontroleerd wordt, wordt er gebruikt gemaakt van frequentiebanden waarvoor geen vergunningen vereist zijn. In het radiospectrum zijn speciale banden gereserveerd voor dit soort toepassingen. Hoewel geen vergunning vereist is, wordt voor sommige banden een restrictie opgelegd zodat alleen één bepaald type systeem van deze band gebruik mag maken. In Europa geldt dit bijvoorbeeld voor de DECT band rond de 2 GHz en de HIPERLAN band rond de 5 GHz.



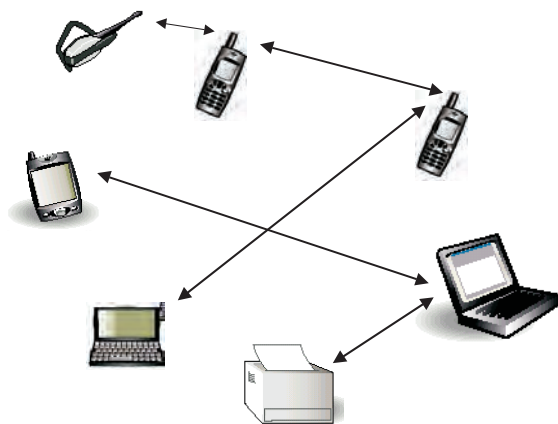
Figuur 18. Voorbeeld van een draadloze extensie van het publieke telefoonnet (PSTN).

De toepassingen vinden we vooral in de huis- en kantooromgevingen. Bij draadloze extensies ligt de nadruk op datasnelheid. Mobiliteit is van minder belang. De huidige extensiesystemen leveren datasnelheden tussen de 1 en 10 Mb/s. Over 5 à 10 jaar zal dit tussen de 10 en 100 Mb/s liggen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat evenals op de kabelnetwerken, deze datasnelheid met een groot aantal gebruikers gedeeld moet worden. Bij toepassing in de huis en kantooromgeving wil de gebruiker bijvoorbeeld zo min mogelijk verschil zien tussen de vaste aansluiting en de mobiele aansluiting. Met de voortschrijdende ontwikkelingen op het vaste net zoals de komst van ADSL (*Asymmetric Digital Subscriber Line*) en FTTC (*Fiber to the Curb*) worden de datasnelheden alsmaar verhoogd. Voor ons radio-ingenieurs blijft het een uitdaging de strijd zo lang mogelijk vol te houden. Maar door de fysische beperkingen van het radiomedium zal de draadloze schakel in de keten altijd de beperkende factor blijven.

Ad-hoc systemen

Tenslotte komen we bij de ad-hoc systemen. Ad-hoc betekent *spontaan*. Bij dit type netwerk kan er spontaan een radioverbinding gemaakt worden tussen twee apparaten zonder tussenkomst van basisstations of een mobiel netwerk. Het bekendste voorbeeld is de walky-talky waarbij twee draagbare zendontvangers direct contact met elkaar onderhouden. Moderne reddingsdiensten maken gebruik van portofoons om onderling contact te onderhouden. Een voorbeeld van een commerciële toepassing is Bluetooth, een systeem dat een draadloze verbinding toelaat tussen twee of meerdere apparaten voorzien van een Bluetooth radiochip.

Verbindingen kunnen kriskras door elkaar opgezet worden; het gescheiden houden van het radioverkeer zoals bij mobiele systemen en draadloze extensies nog enigszins mogelijk is door geografische scheidingen en door gecoördineerde acties tussen de basisstations, is bij ad-hoc systemen niet meer mogelijk. Bij ad-hoc verbindingen verandert het gecontroleerde radioverkeer in een chaotische toestand. Omdat onderlinge radioverbindingen niet gecoördineerd kunnen worden, moet gebruik worden gemaakt van geheel andere radiotechnieken. Het zal U niet verbazen dat juist dit soort technieken als eerste toegepast werden in de militaire sector. Speciale technieken zijn nodig om ongewenste storingen, per ongeluk of met opzet gegenereerd, te onderdrukken of te omzeilen. In plaats van pogingen te doen om te coördineren, maakt men gebruik van breedbandige en in de tijd sterk variërende signalen die op ruis lijken. Storing dat lijkt op ruis is makkelijker te onderdrukken.



Figuur 19. Voorbeeld van een ad-hoc systeem.

Het Bluetooth systeem maakt gebruik van frequentiehoppfen. Dit betekent dat het signaal springt van het ene smalle frequentiebandje naar het andere smalle frequentiebandje volgens een pseudo-willekeurig hoppatroom dat alleen bij de zender en ontvanger bekend is. Iedere verbinding springt volgens een ander hoppatroom, en storende zenders worden ervaren als ruis. Frequentiehoppfen werd in de tweede wereldoorlog toegepast voor radiografische besturing van Amerikaanse torpedo's. Als je het patroon niet kent waarmee de zendontvangers hoppfen, dan is het onmogelijk de radioverbinding te onderscheppen. Het waren geen militaire radiodeskundigen die deze techniek uitvonden. Integendeel, het was de van origine Oostenrijkse filmster Hedy Lamarr (1914-2000) die

frequentiehoppfen uitvond. Zij was getrouwd met een Oostenrijkse wapenhandelaar en kwam daardoor in aanraking met wapensystemen. Vlak voor het uitbreken van de tweede wereldoorlog verliet zij Europa voor een filmcarrière in Hollywood. Daar werkte zij nauw samen met de pianist en componist George Antheil. Het idee voor frequentiehoppfen kwam gedurende een quatre main spel achter de piano:

"Hij sloeg de piano toetsen aan en ik volgde ze. Kijk, we communiceren met elkaar en toch veranderen we de hele tijd."

In 1942 patenteerde zij samen met haar pianist het concept van frequentiehoppfen. Behalve door dit patent werd Hedy bekend door haar nogal zwoele rollen en haar spraakmakende werk op het gebied van naaktscènes onder andere in de film *Ecstasy* uit 1932.



Figuur 20. Hedy Lamarr, de uitvindster van frequentiehoppfen.

Ad-hoc radiosystemen met als voorbeeld Bluetooth openen een geheel nieuw toepassingsgebied voor radio. Goedkope, kleine radio's ingebouwd in apparaten die we dagelijks gebruiken, geven de mogelijkheid informatie tussen de apparaten onderling te laten uit te wisselen, zelfs zonder onze tussenkomst. In analogie met *Embedded Computing*, een wijdverspreide toepassing van microprocessoren die elk apparaat een zekere mate van intelligentie geeft, verschaft de wijdverspreide toepassing van Bluetooth radio's *Embedded Connectivity*, zodat er een directe, draadloze verbinding gelegd kan worden naar het binnenste van elk apparaat. Door deze embedded connectivity kunnen de functies van verschillende apparaten

gecombineerd worden, kunnen apparaten draadloos geactiveerd worden, en kunnen handelingen automatisch uitgevoerd worden al naar gelang de onderlinge posities van de Bluetooth radio's. De meest voor de hand liggende toepassingen zijn verbindingen tussen laptops, mobiele telefoons, oortelefoons, personal digital assistants (PDA), en andere draagbare, persoonlijke apparaten. Net zoals bij embedded computing de gestage prijsdaling van de processoren een enorm toepassingsgebied blootlegde, zo is ook bij de embedded connectivity een lage kostprijs van de zondontvangers van essentieel belang. Dit kan alleen bereikt worden met radio's die geïntegreerd kunnen worden op één enkele chip. De Bluetooth technologie is geheel geoptimaliseerd om deze één-chips implementatie mogelijk te maken.

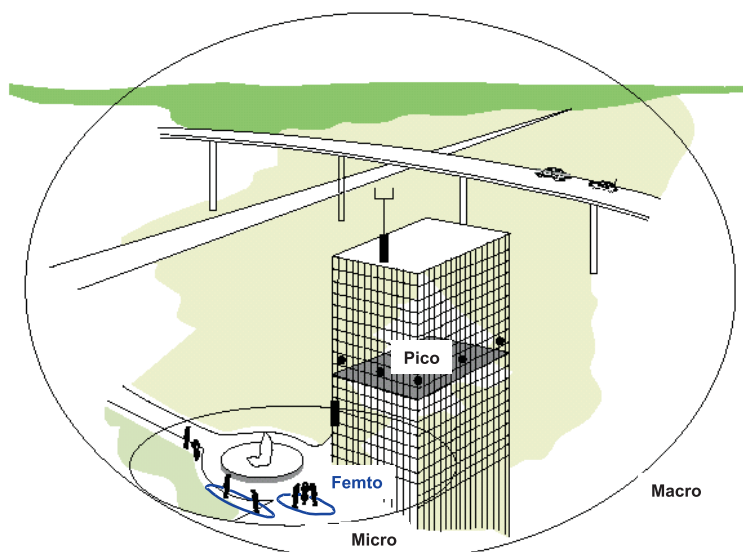
Net zoals bij de draadloze extensies kan voor ad-hoc systemen geen gebruik worden gemaakt van radiofrequenties waarvoor vergunningen vereist zijn. Elke gebruiker is zijn eigen netwerkbeheerder. Omdat het ad-hoc netwerk zwevend is, dat wil zeggen het is niet verbonden aan basisstations die geografisch op vaste locaties staan, moet de frequentieband ook nog eens wereldwijd beschikbaar zijn. Reizigers die vliegen van het ene continent naar het andere zullen hun persoonlijke netwerkje overal ter wereld willen gebruiken zonder tussenkomst van lokale autoriteiten of dienstverleners. Voor Bluetooth wordt de ISM (*Industrial-Scientific-Medical*) band gebruikt, een band die geheel vrij staat voor radioapparatuur mits het zendvermogen beperkt blijft en het signaal

over de band verspreid wordt. Het feit dat er allerlei radiozenders van babyfoons tot aan magnetronovens aanwezig kunnen zijn die voor de Bluetooth verbinding als storend ondervonden worden, moet het radioprotocol redelijk robuust zijn. Het al eerder besproken frequentiehoppelen levert hieraan een belangrijke bijdrage.

Femtocellen

Grenzen aan de capaciteit als gevolg van het beperkt bruikbare elektromagnetisch spectrum, grenzen aan de datasnelheid als gevolg van het beperkt aanwezige zendvermogen in draagbare apparatuur, hoe kunnen we deze grenzen verleggen? Het antwoord is door het gebruik van *femtocellen*. Door de afstanden tussen zondontvangers alsmaar kleiner te maken, kunnen radiofrequenties op kortere afstanden hergebruikt worden wat capaciteit oplevert. Daarnaast kunnen hogere datasnelheden behaald worden omdat de propagatieverliezen verminderen en de energie per ontvangen bit stijgt. Door afstanden te verkleinen gaan we van macrocellen met een bereik van enkele kilometers, naar microcellen met een bereik van enkele honderden meters, naar picocellen met een bereik van enkele tientallen meters, naar femtocellen met een bereik van enkele meters. Wat toeneemt is het aantal basisstations en de complexiteit om het verkeer van al deze basisstations te reguleren. Deze aanpak vraagt allereerst om simpele basisstations, meer als simpele omzeters tussen een radiomedium en een kabelmedium. Basisstations die als kauwgum op willekeurige locaties

Figuur 21. Hiërarchische verdeling met op het laagste niveau de femtocellen.



geplakt kunnen worden, al dan niet aan een kabelnetwerk. Ten tweede moeten de basisstations autonoom kunnen handelen: kanaalkeuze en controle van het verkeer kunnen niet meer door een centrale eenheid geregeld worden. Afhankelijk van de aanwezige propagatie- en storingscondities, wordt het radiokanaal aangepast voor een zo optimaal mogelijke signaaloverdracht. Deze condities zijn alleen lokaal bekend en zullen lokaal door het basisstation verwerkt moeten worden. Systemen gebaseerd op draadloze extensies gaan al een stap in deze richting. Ad-hoc systemen zoals Bluetooth gaan nog een stap verder. Dit soort radiosystemen werken geheel autonoom, passen zich aan aan lokale condities en storingen, werken in een ongecontroleerd omgeving, en verschaffen hoge datasnelheden echter bij korte afstanden. Zelfregulerende radiosystemen vormen de toekomst.

CV

Jaap C. Haartsen studeerde af en promoveerde (beide cum laude) op het gebied van de halfgeleider fysica respectievelijk in 1986 en 1990 op de faculteit Elektrotechniek, Technische Universiteit Delft. In 1991 begon hij bij Ericsson in de VS en werkte aan mobiele communicatie systemen. In 1993 keerde hij terug naar Europa en legde in 1994 bij Ericsson Zweden de fundamenten voor het draadloze communicatie systeem Bluetooth. In 1997 zette hij deze werkzaamheden voort in Nederland, en is nu werkzaam als Chief Scientist bij het bedrijf Ericsson Technology Licensing, waarvan een onderdeel ondergebracht is in Emmen. In Juni 2000 werd hij benoemd tot (deeltijd) hoogleraar Mobiele Radio Communicatiesystemen aan de faculteit Elektrotechniek, Technische Universiteit Twente. Hij is de auteur van een groot aantal wetenschappelijke publicaties en heeft vele patenten op zijn naam staan.



Referenties

- [1] W.M. Dalton, "The story of radio," Adam Hilger Ltd., London, 1975.
- [2] P.J. Nahin, "The science of radio," AIP Press, Woodbury, 1996.
- [3] G. Calhoun, "Digital cellular radio," Artech House, 1988
- [4] A.T. de Hoop, "Theory van het elektromagnetische veld," Delftse Universitaire Pers, 1975.
- [5] M. Alonso and E.J. Finn, "Fundamental University Physics - part 2," Addison-wesley, London 1980.

