

KONINKLIJK NEDERLANDS
METEOROLOGISCH INSTITUUT

D e B i l t

Verslagen

V - 233

J.J.M. van Gorp

Digitale signaal verwerking

De Bilt, 1971

Publikatienummer: K.N.M.I. V-233 - (I)

(tevens verslag van een colloquium
gehouden op 3 oktober 1970)

Inhoud

1. Inleiding	1
2. Analooq versus digitaal	2
3. Eigenschappen van de meetvoeler	4
3.1. Het begrip nauwkeurigheid	4
3.2. Het begrip gevoeligheid	5
3.3. Het begrip responsie	7
4. Digitale meettechniek	9
5. Digitale universele rekenmachine	13
5.1. Digitale tijdsmeting	13
5.2. Digitale snelheidsmeting	14
6. Correlatie metingen m.b.v. een speciale rekenmachine	16
6.1. Experimentele bepaling van kruiscorrelatie	17
6.2. Eigenschappen van correlatie functie	18
7. Conclusies en aanbevelingen	20
Literatuur opgave	21

Digitale signaal verwerking

1. Inleiding

Meteorologische gegevens - zoals wind, temperatuur en vochtigheid - zijn continu variabele grootheden in de tijd. Door een "meetvoeler" vindt omzetting naar een elektrisch signaal plaats: analoog signaal.

Het is ook mogelijk het meetgegeven op bepaalde tijdstippen te bemonsteren. In dit geval ontstaan er cijferreeksen vandaar de benaming digitaal signaal. In beide gevallen moet het meetgegeven omgezet worden. Hierbij komen begrippen aan de orde die in de praktijk nog al eens verkeerd gehanteerd worden, deze zijn:

- nauwkeurigheid (betrouwbaarheid),
- gevoeligheid (resolutie),
- reactie snelheid (responsie).

Aan een meetvoeler worden specifieke en strenge eisen gesteld, omdat de natuur zich tegen iedere ingreep (= meting) verzet. De beïnvloeding van de "natuurlijke orde" moet bij het meten minimaal zijn. Aan de hand van voorbeelden zal hier nader op worden ingegaan.

Nadat een elektrisch signaal verkregen is, moet hiermee gerekend worden. Dit kan m.b.v. een analoge- of een digitale rekenmachine ("computer" is een te mysterieuze benaming !). Een digitale rekenmachine is nauwkeuriger, tevens langzamer dan een analoge.

Bij de verwerking van meteorologische gegevens wordt tot op heden te weinig gebruik gemaakt van de specifieke voordelen van een "elektronische rekenmachine". Door een weloverwogen (en tijdig) formuleren van de gewenste gegevens kunnen details achterwege blijven. Rekenmachines voor een speciaal probleem (bv. gemiddelden of extremen) kunnen in kosten wedijveren tegen de kosten van een langdurige opslag van detail informatie.

2. Analoog versus digitaal

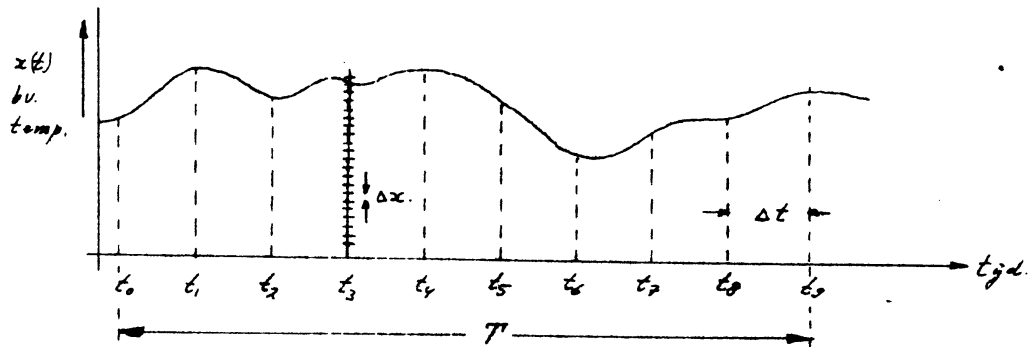


fig. 2.1. Aanaloog signaal, bemonsterd op $t_0, \dots, 9$.

In fig. 2.1. is, ter illustratie, een continu variërende grootte weergegeven. Dit kan bv. de dagelijkse gang van de luchttemperatuur zijn.

Via zijn zintuigen staat de mens met de buitenwereld in relatie. Efficiënt blijkt het gezichtsvermogen te zijn, reden waarom de meest gevraagde meteorologische waarneming bestaat uit een registratie, waardoor een beeld van de werkelijkheid gevormd kan worden. Vandaar dan ook de historisch gegroeide term "analoog": een analoge registratie is "overeenkomstig" de werkelijkheid. Een tweede methode om een indruk te hebben van de werkelijkheid is het tabelleren van bv. uurlijkse waarnemingen. Gebruikelijk is hierbij in het tientalig stelsel de dagelijkse gang van de temperatuur aan te geven tot op $0,1^{\circ}\text{C}$. Ook dit is in fig. 2.1. aangegeven door de "bemonsteringen" op de tijdstippen $t_0, 1, 2, \dots$ etc.

De verticale indeling van de meting op t_3 geeft aan dat geteld wordt hoeveel maal $0,1^{\circ}\text{C}$ past tussen de tijdsas en de onbekende grootte (deze tijdsas is op 0°C te leggen). Er is in dit geval dus sprake van een kwantisering zowel in de tijd als in de grootte van het signaal. Hierbij lijkt het alsof er een groffe benadering van de werkelijkheid wordt gegeven. Door Shannon is echter gestipuleerd dat indien de bemonsteringstijdstippen voldaan aan formule 2.1. er geen verlies aan informatie optreedt:

$$\Delta t \leq \frac{1}{2W} \quad (2.1.)$$

Hierin is Δt het tijdverschil tussen twee bemonsteringen en W de bandbreedte van het signaal. Kwantitatief is deze stelling van Shannon m.b.v. de Fourieranalyse (overgang van tijdsdomein t naar frekwentie domein W) bewezen. Kwalitatief is in te zien dat hoe "interessanter" een signaal is (= snelle wisselingen vertoont = veel informatie bezit) hoe meer meetpunten wij in de tijd moeten kiezen om het oorspronkelijke signaal te kunnen reconstrueren.

Bij het bemonsteren van continu variabele grootheden krijgen wij discontinu cijferreeksen vandaar de benaming: "digitaal". Uit het voorgaande zal duidelijk zijn dat ook in de digitale signaal verwerking de gemeten waarden zich overeenkomstig de onbekende grootte gedragen! In het onderstaande dient dan ook de term "analoog" als "continu variabele grootte" opgenomen te worden. Door het bemonsteren op equidistante tijdstippen van een analoog signaal krijgen wij een digitaal signaal: "analoog-digitaal omzetting". Het omgekeerde proces komt ook voor bv. bij televisie. Hierbij wordt een digitaal signaal (lichtflitsen) door ons oog ervaren als een analoog signaal.

Nemen wij, zoals aangegeven in fig. 2.1, een beperkte meettijd T dan is formule 2.1. ook als volgt weer te geven:

Als $x(t)$ begrensd is in frequentie W en tijdsdomein T , dan is $x(t)$ volledig bepaald door $2WT$ bemonsteringen.

Nemen wij meer bemonsteringen (in formule 2.1. $\Delta t < \frac{1}{2W}$) dan treedt "redundantie" (= overvloedigheid) op. Een voorbeeld hiervan is de spreektaal: onverstanebare woorden en letters zijn meestal te raden door hun statistische volgorde.

3. Eigenschappen van de meetvoeler

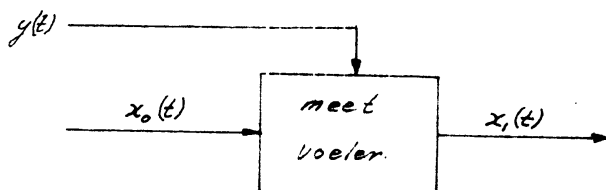


fig. 3.1.

3.1. Het begrip nauwkeurigheid

Dit wordt o.a. aangegeven door de termen absolute- en relatieve fout, resp.:

$$\text{absolute fout} = x_1 - x_0 = \Delta x \quad (3.1.1)$$

$$\text{relatieve fout} = \frac{\Delta x}{x_0} \quad (3.1.2)$$

hierin is x_0 = werkelijke waarde = ingangssignaal

x_1 = gemeten waarde = uitgangssignaal

Statistisch wordt daarbij nog extra onderscheid gemaakt tussen: systematische-, totale- en grootst mogelijke fout.

Door het gebruik van een "goede standaard" is Δx uit ijkings te bepalen. Het zal duidelijk zijn dat bij ijkings het gehele meetsysteem in aanmerking genomen moet worden. De elektrische weerstand van een platina draad is een functie van de temperatuur. Om een zichtbaar resultaat te krijgen wordt het verkregen signaal versterkt (ook bij thermografen is dit het geval). De mate van versterking is eveneens temperatuur afhankelijk. Op het meetsysteem kan dus een storende tijdsfunctie $y(t)$ inwerken (zie fig. 3.1).

$$\text{bv.: } x_1 = f(x_0, T) = f(x_0) + f(T) \quad (3.1.3)$$

hierin is T het temperatuursverloop van de versterker. Is deze $T = T(t)$ dan is ook de absolute fout een tijdsfunctie.

Naast ijking is het dus noodzakelijk te voldoen aan een der voorwaarden:

- a. ongewenste temperatuur effecten zo klein mogelijk te houden (bv. drift-arme versterkers);
- b. compenserend meten;
- c. ongewenste temperatuur effecten in rekening brengen door meerdere ijkings.

Hierbij moet ook het eigen opwarmeffect van een meetsysteem in aanmerking genomen worden.

3.2. Het begrip gevoeligheid

Onder deze term vallen twee afzonderlijke begrippen:

a. De differentiële gevoeligheid:

$$s = \frac{\Delta x_1}{\Delta x_0} \quad (3.2.1)$$

hierin is: s = sensitivity = gevoeligheid,

Δx_0 = verandering in ingangssignaal,

Δx_1 = verandering in uitgangssignaal.

b. De aanspreek gevoeligheid: $\Delta x_{0, \min}$.

Dit is het kleinste ingangssignaal waarop een meetsysteem aanspreekt, bv. de minimale windsnelheid waarop een cup-anemometer begint te draaien. M.a.w. aan de uitgang van een meetsysteem moet met voldoende zekerheid beslist kunnen worden of er een ingangssignaal was!

Een meetsysteem is altijd onderhevig aan een zekere "ruis"; bv. thermische ruis in weerstand, Brownse beweging, speling in lagers. Deze verstoring is te beschouwen als een stoorsignaal $y(t)$ wat naast $x_0(t)$ - op het meetsysteem inwerkt (zie § 3.1.)

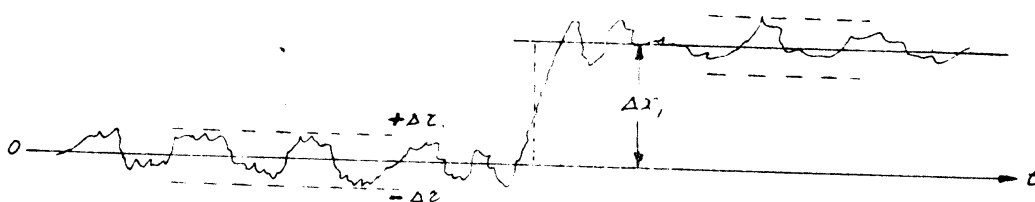


fig. 3.2. Gevolg van ruis in/op meetsysteem.

Indien nu $\Delta x_1 \leq 2\Delta r$ is er op de uitgang niet te beslissen of er een ingangssignaal was. Uit de eigenschappen (= parameters) van een meetsysteem is de optimale kwantisering in de signaalgrootte bepaald:

$$\Delta x_{0, \min} = \frac{2\Delta r}{s} \quad (3.2.2)$$

In fig. 2.1. wordt nu het aantal kwantisaties:

$$k = \frac{x_{o,max}}{\Delta x_{o,min}} \quad (3.2.3)$$

waarin: $x_{o,max}$ = maximale signaalgrootte over de meettijd T.
 $\Delta x_{o,min}$ = minimaal te onderscheiden signaalgrootte.

bv.: temperatuur registratie:

volle uitslag = $20^{\circ}\text{C} = 100 \text{ s.d.}$
"nuttige" resolutie = $0,2^{\circ}\text{C} = 1 \text{ s.d.}$
"oog-schattings" resolutie = $0,1^{\circ}\text{C} = 0,5 \text{ s.d.}$
s.d. = schaaldeel

Dit voorbeeld is een praktijkgeval: men maakt nogal eens de fout de gevoeligheid (= minimaal af te lezen verandering) met de nauwkeurigheid (1% meter $\rightarrow 0,2^{\circ}\text{C}$) te verwarren.

Deze twee aspecten van een meetsysteem zijn onafhankelijke parameters. In het genoemde voorbeeld zijn er $k=100$ mogelijke beslissingen aangaande de signaalgrootte.

Per bemonstering zijn er k -stapjes te onderscheiden, zie fig. 2.1. Het totaal aantal mogelijkheden (n) van een in meettijd T en frekwentie W begrensde signaal is:

$$n = k^{2WT} \quad (3.2.4)$$

Per definitie is de hoeveelheid informatie (info I) bepaald door het aantal keuze mogelijkheden:

$$I = {}^2\log n = 2WT \cdot {}^2\log k \quad (3.2.5)$$

d.w.z. meer info bij hogere frekwentie, meer info in langere meettijd. Verder volgt uit de "behoudswet van informatie", dat:

$$WT = \text{constant} \quad (3.2.6)$$

d.w.z. langzaam afdraaien van snelle magneetbandregistratie gaat niet gepaard met informatie verlies.

De radix - d.i. grondtal v.d. logaritme - komt voort uit de keuze van het tweetalig stelsel. De informatie inhoud wordt daarbij vereenvoudigd tot de keuze tussen twee mogelijkheden: ja of neen, d.i. "binair" 0 of 1. Vandaar de term "bit" = "binaire digit" = binair cijfer.

Eén schakelaar kan open of dicht staan: $n = 2 \rightarrow I = {}^2\log 2 = "1 \text{ bit-info}"$.
Twee schakelaars leveren: $n = 4$, d.w.z. $I = {}^2\log 4 = "2 \text{ bits-info}"$.

De schrijftaal bezit 26 letters plus een rustteken dat eveneens met een bepaalde frekwentie voorkomt: $n = 27$ d.w.z. $I = {}^2\log 27 = "4,76 \text{ bits-info}"$.

Door de overvloedigheid in de taal (1/3 deel is te raden) blijft er 4,04 bits aan reële informatie over.

In deze paragraaf is summier ingegaan op de "informatie-theorie", met als opzet duidelijk te maken, dat:

- nauwkeurigheid en gevoeligheid onafhankelijk van elkaar zijn, wel is eis aan meetsysteem: $nwk. > gev.$
- de reciproke waarde van de gevoeligheid, d.i. de "resolutie" of onderscheidings vermogen, is een maat voor de informatie inhoud van een boodschap of signaal.
- de digitale meetmethode ("sampled data system") geen vermindering aan informatie inhoudt.

3.3. Het begrip responsie van een meetsysteem

Dit is de reaktiesnelheid van het meetsysteem op een veranderend ingangssignaal: $\frac{dx_0}{dt} \rightarrow \frac{dx_1}{dt}$, zie fig. 3.1.

Dit wordt bepaald door het "dynamisch gedrag" van het meetsysteem.

In fig. 3.3. zijn enkele voorbeelden weergegeven.

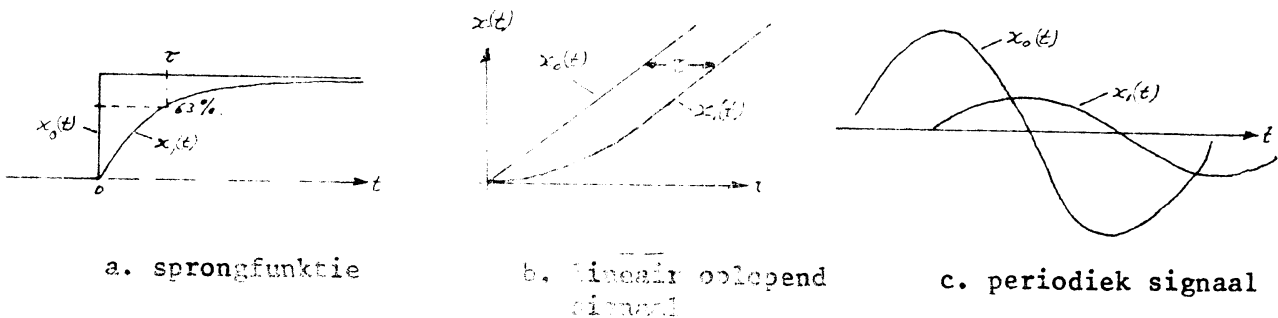


fig. 3.3. Dynamisch gedrag van meetsysteem.

Geval a. doet zich voor bij het snel indampelen van een thermometer element, met temperatuur T_1 , in een vloeistof waarvan de temperatuur $\neq T_1$. De reactie van de thermometer $x_1(t)$ is een exponentiële kromme indien wij deze als een zgn. 1^e orde systeem mogen beschouwen. Dit is het geval als er sprake van één thermische weerstand R en één thermische capaciteit C .

De "responsie tijd" $\tau = R.C$ bepaalt de tijd waarin het oorspronkelijk temperatuur verschil tussen thermometer en vloeistof gezakt is tot het $1/e$ deel.

Opm. Proeven met grondthermometers wezen uit dat er meerdere R's en/of C's van invloed zijn. De reactie kromme $x_1(t)$ vertoonde dan ook een merkbare knik in de registratie.

Naast het thermometer element is er nog een RC-tijd van het omhulsel, in dit geval koper en grond. Wij hebben in dat geval dan ook te doen met een 2e orde systeem.

Geval b. geeft het najlen van bv. de temperatuur bij een lineair oplopend ingangssignaal, bv. klimaatkast.

Bij de indringing van de zonnewarmte in de grond doet zich geval c. voor. Wij zien een najling en demping ($= f(\tau)$) van de dagelijkse temperatuur-gang in de aardbodem.

Opm. Door de grote traagheid ($\tau \approx 30$ min.) van een ongeventileerde Stevensonhut is het geregistreerde temperatuurverloop verre van het werkelijke. Uit fig. 3.3. zal duidelijk zijn dat het vergelijken van instrumenten met een verschillende traagheid τ alleen zin heeft indien de te meten grootheid gedurende langere tijd stabiel is.

4. Digitale meettechniek

Ter illustratie zal hieronder de overgang van "zuiver analoog" naar "zuiver digitaal" stapsgewijs aangegeven worden.

Er zij hierbij wel op gewezen dat de toepassing van een elektronische rekenmachine een moderne meettechniek vereist, d.w.z. kwikthermometers, psychrometers, kwikbarometers als traditionele instrumenten beschouwd worden.

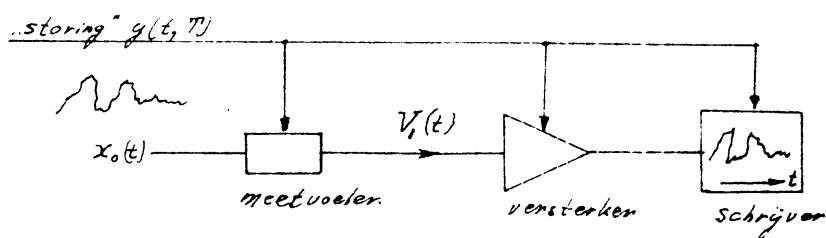


fig. 4.1. Analoge meettechniek

Omdat bij de analoge meting "iedere waarde zin heeft", kan storing op ieder element van de meetschakel invloed uitoefenen.

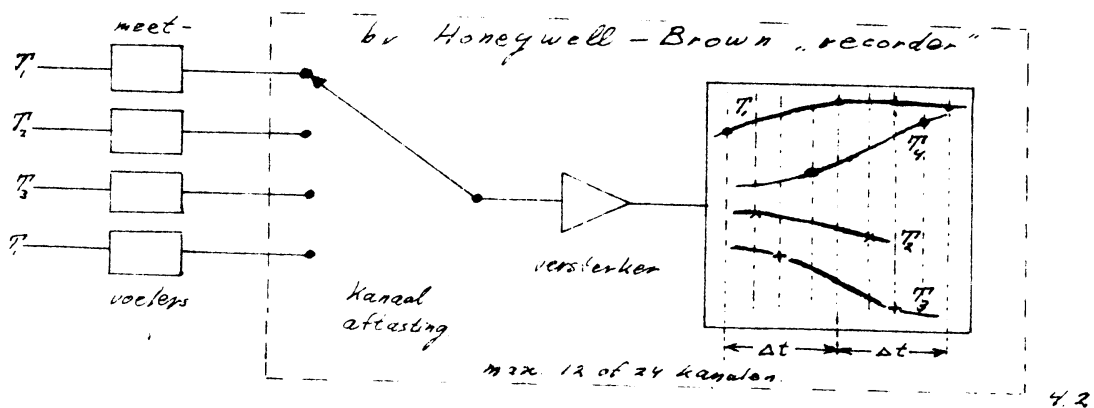


fig. 4.2. Bemonstering van analoge signalen

Door de hoge prijs van "ruisarme" versterkers en registratoren gaat men veelal over tot het gezamenlijk gebruik van deze elementen voor meerdere meetgegevens. Gevolg is een kwantisering in de tijd, waarbij de bemonsteringsfrequentie beperkt wordt door de mechanische registrator. Dit is echter voor de meeste meteorologische gegevens geen bezwaar.

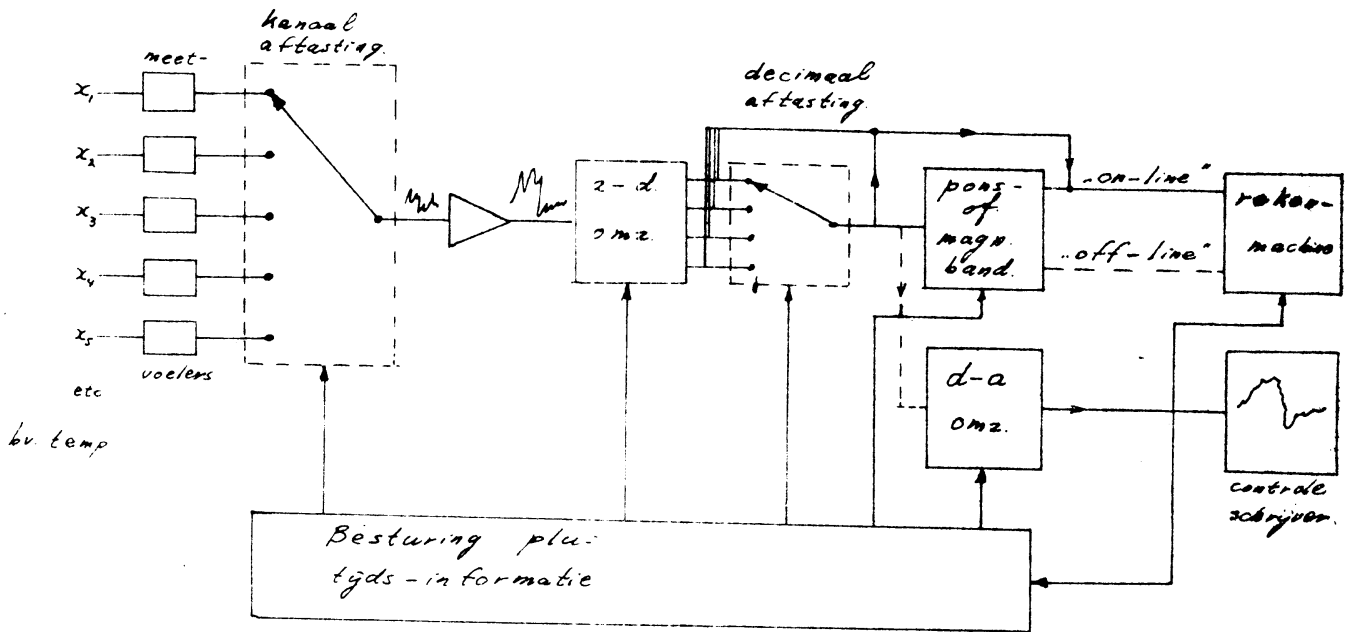


fig. 4.3. Bemonstering in tijd en signaalgrootte

Na de "ruisarme" versterker vindt analoog-digitaal omzetting plaats: de analoge spanning wordt omgezet in een reeks pulsen. Lineariteit tussen analoge spanning en aantal pulsen per tijdseenheid bepaald mede de nauwkeurigheid en prijs van de a - d omzetter. Het aantal pulsen per eenheid van de analoge spanning is gemakkelijk op te voeren en bepaald de gevoeligheid van de a - d omzetter.

De a - d omzetter wordt gevolgd door een volledig digitaal systeem. Hierin worden, op commando van de besturing, het aantal pulsen geteld. Iedere decimaal ($a_1 \dots a_n$) wordt binair gecodeerd - BCD-code - volgens:

$$y = a_0 \cdot 10^0 + a_1 \cdot 10^1 + a_2 \cdot 10^2 + \dots + a_n \cdot 10^n \quad (4.1)$$

$$a_n = b_0 \cdot 2^0 + b_1 \cdot 2^1 + b_2 \cdot 2^2 + b_3 \cdot 2^3 \quad (4.2)$$

$$b_{0,1,2,3} = \text{binair} = "0" \text{ of } "1" \quad (4.3)$$

Formule (4.2) geeft de zgn. 1-2-4-3 code aan. Nemen wij hierin $b_0 = b_1 = b_2 = b_3 = "1"$ dan is $a_n = 15$, waaruit blijkt dat wij in dat geval ons doel voorbij gestreefd hebben: in de keuze van codering ligt een mogelijkheid tot het herkennen en zelfs verbeteren van fouten: theorie van Hamming.

De coëfficiënten $b_{0,1,2,3}$ vormen de 4 "bits" die minimaal nodig zijn om een decimale waarde te kunnen weergeven. Dit levert $\frac{16!}{(16-n)!} = 29 \cdot 10^9$ coderings mogelijkheden, vandaar de coderings moeilijkheden bij apparatuur van verschillende fabrikanten.

Na de codevorming wordt decimaal voor decimaal op een pons- of magneetband opgeslagen, d.i. "incrementeel" = stapsgewijs. Wanneer er sprake is van snelle "data-logging" (= opslaan van gegevens, logboek) gaat men over op:

- a. synchrone magneetband, waarbij informatie per blok, van een groot aantal "bits", tegelijk opgeslagen wordt.
- b. rechtstreeks data verwerking in digitale rekenmachine: "on-line" werkwijze.

ad. a. In de "incrementele" magneetband recorders zit een zeer snelle ontwikkeling, het is de vraag of er in de toekomst voor data-logging systemen nog wel synchrone magneetband zal worden gebruikt.

ad. b. Men moet bedenken dat er voor een synchrone magneetband apparatuur al een hoeveelheid telwerk verricht moet worden zodat er in feite al sprake is van een "computer" (voor verklaring zie paragraaf 5).

Tenslotte staat de term "off-line" voor het traditionele vervoer van pons- of magneetbanden van en naar de rekenmachine. Voor een groot project - zoals de 200 m-mast - zal dit een omvangrijke documentatie eisen en een inefficiënt gebruik van "de computer" betekenen als sorteermachine.

De volgende stap is een "volledig" digitaal systeem. Hierbij wordt of:

- a. van het analoge signaal alleen een of meer zgn. drempelwaarden gebruikt.
- b. de te meten waarde direkt binair toegevoerd bv. roterende pulsvormer, codeschijf.

In de volgende paragraaf zullen hiervan voorbeelden gegeven worden. Ter illustratie volgt hier nog de windrichtings bepaling.

Dit gebeurt met behulp van een windvaan. De stand van deze windvaan (in het horizontale vlak draaibaar) is bepalend voor de windrichting. De draaiingsas is verbonden met het sleepkontakt van een potentiometer. De weerstand tussen dit kontakt en een der einden van de potentiometer is dan een maat voor de windrichting. Deze is direkt of in een brug om te zetten in een elektrische spanning, die dan weer aan de a - d omzetter in fig. 4.3. als meetwaarde toegevoerd kan worden.

Door het "stochastische" karakter (buigigheid) van de wind is men i.h.a. niet geïnteresseerd in een erg grote resolutie in de windrichting. Aangenomen dat een indeling tot $\pm 1^\circ$ voldoende is, kan men nauwkeuriger gebruik maken van een in 360° segmenten verdeelde codeschijf. Men heeft dan nl. geen last van voedingsspanning en weerstand variaties die bij de "analoge" potentiometer methode van direkte invloed zijn op de nauwkeurigheid.

Bij de genoemde codeschijf wordt de nauwkeurigheid bepaald door de precisie van de segment-verdeling en het optisch of elektro magnetisch meetsysteem. Moderne technieken laten dit probleem gemakkelijk oplossen.

Tenslotte is te bedenken dat bij het gebruik van een draai-potentiometer de cirkel onderbreken wordt. De a - d omzetting maakt er als het ware een rechte van met eindige lengte. Dit kan bij middeling problemen opleveren.

Het is opmerkelijk hoe traag zich nieuwe ontwikkelingen in de meteorologie laten invoeren. De bestaande meetmasten van het K.N.M.I. zijn hiervan een sprekend voorbeeld.

In een evaluatie rapport (6) wordt er, als vanzelf sprekend, vanuit gegaan dat er in de meteorologie moderne meet- en verwerkingsmethoden worden toegepast.

In dit verband is ook (7) leerzaam.

5. Digitale rekenmachine

De naam "computer" wordt veelvuldig gebruikt voor een apparaat wat "alles" aan kan. Inderdaad is de op het K.N.M.I. aanwezige "Electrologica X-8" tot zeer veel rekenbewerkingen te programmeren. Men spreekt in dat geval van een universele rekenmachine met veel "software" (= zachte componenten): de machine is m.b.v. een rekenprogramma te besturen. De elektronische onderdelen in de rekenmachine behoren tot de zgn. "hard ware" (= harde componenten): er is veel tijd nodig om de groepering van schakelingen te wijzigen. Een digitale rekenmachine bestaat nl. in hoofdzaak uit een zeer groot aantal optel c.q. aftrek schakelingen. Evenals bij gewoon rekenwerk moeten uitkomsten van deelbewerkingen worden opgeslagen, in een "geheugen". Het belangrijkste en meest kritieke onderdeel wordt gevormd door de "besturing": deze verzorgt op commando van het "ingelezen rekenprogramma" de juiste tijdsvolgorde van de verschillende bewerkingen.

Bij "date logging" systemen is evenze sprake van een besturingsgedeelte. Doordat hierbij steeds in een vaste volgorde gewerkt wordt is dit i.h.a. "hard ware". Indien nu duidelijk aangegeven kan worden wat voor informatie men uit de meetgegevens wil halen, is het mogelijk de apparatuur daarop af te stemmen. Vooral bij langdurende tijdreeksen is dit van groot belang. Het gemiddelde bepalen uit bv. 10 waarnemingen ("10 minuten gemiddelde") is een te simpele bewerking om daarvoor een grote "programmeerbare" rekenmachine in te zetten. Hieronder volgen enkele eenvoudige voorbeelden waarbij - naast meten - ook al van rekenen sprake is:

5.1. Digitale responsie tijdsmeting:

Een probleem bij het meten van grondtemperaturen is de "warmtelek" die bij een elektrische geleider (met warmte geleidings coëfficiënt λ_1) optreedt door het inbrengen in de bodem (λ_2).

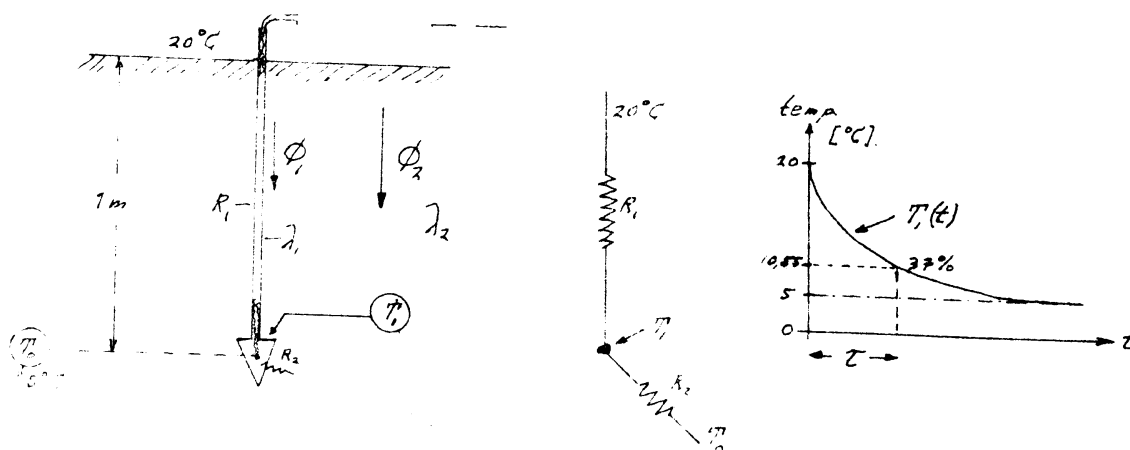


fig. 5.1.1 Kontaktweerstand tussen thermometer en grond.

In bovenstaande figuur is een eis die aan de meetvoeler gesteld moet worden dat $R_1 \gg R_2$, waardoor weinig verstoring van de te meten temperatuur T_0 op kan treden. Dit betekent dat dan R_2 bekend moet zijn, althans bij benadering. Een van de mogelijkheden is responsie onderzoek: de reactie van de meetvoeler $T_1(t)$ bij plotseling inbrengen in de grond. Bij een registratie ontstaat - in het ideale geval - een exponentiële kromme die gekarakteriseerd wordt door een R.C-tijd τ . Indien men hierbij aanneemt dat de warmtecapaciteit C van de meetvoeler bekend is, laat zich R_2 gemakkelijk berekenen.

Hoe is nu de gevraagde τ te bepalen?

- Met enig handwerk uit een analoge registratie.
- M.b.v. een rekenprogramma na eerst de analoge registratie op een zgn. diagramleesapparaat om te zetten in ponsband (a - d omzetting).
- Meer efficiënt is het direct digitaal registreren van het temperatuurverloop.
- Door het "tellen" van de tijd τ , zie fig. 5.1.2:

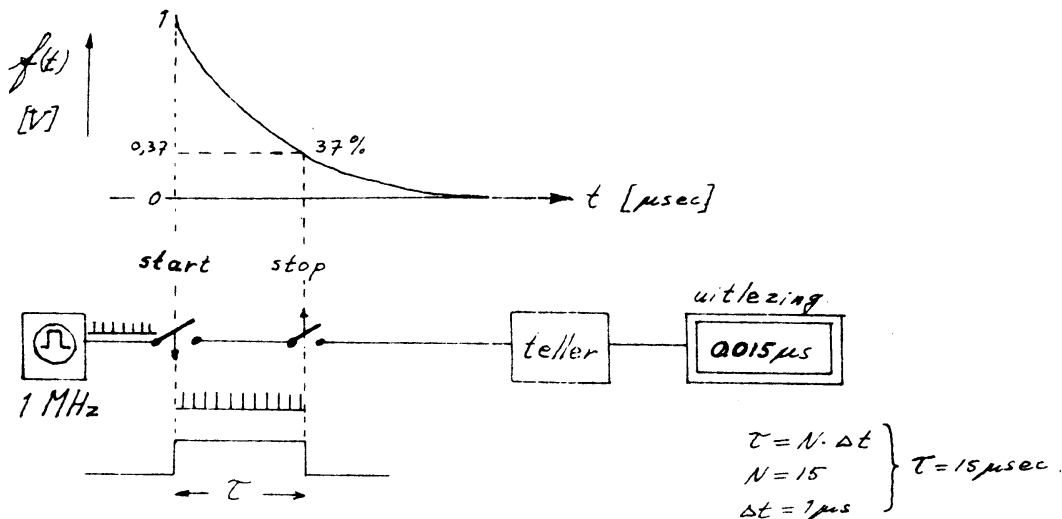


fig. 5.1.2. Digitale meting van responsie tijd.

Opm. Het hierboven uitvoerig beschreven grondthermometer onderzoek is gestopt vanwege de te onbetrouwbare digitale apparatuur die op dat moment voorhanden was. Er is daarop een uitvoerige studie gemaakt over de toepassing van Boole-algebra in dit soort apparatuur, waaruit blijkt dat een hogere betrouwbaarheid gemakkelijk te bereiken is (1).

5.2. Digitale windsnelheidsmeting

De windsnelheid wordt gemeten met een "cup-anemometer", dit is een molentje met verticale as. De rotatie snelheid is daarbij een maat voor de windsterkte. Vroeger gebruikte men een elektrische dynamo die de draaiing omzet in een analoge spanning. Logisch gevolg hiervan was een analoge registratie.

Het merkwaardige doet zich echter voor dat men overgestapt is op een pulsvormer=digitaal signaal, terwijl men toch nog steeds analoog blijft registreren. Bij het verwerken van windgegevens m.b.v. de digitale rekenmachine is een ponsband vereist. Deze wordt dan d.m.v. een a - d omzetting, zoals weergegeven in fig. 4.3, geproduceerd. Uit deze ponsbandregistraties worden dan weer 10 minuut gemiddelden, extremen etc. berekend. Dit is een eenvoudig rekenprogramma wat door de veelvuldigheid van gebruik beter in hardware uitgevoerd kan worden:

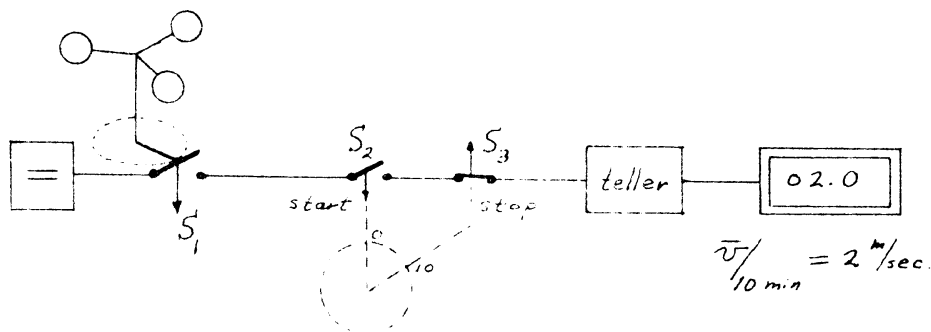


fig. 5.2. Digitale windsnelheids integratie

In de figuur is een spanningsbron via schakelaars $S_{1,2,3}$ verbonden met een pulsenteller. Bij iedere omwenteling wordt schakelaar S_1 kortstondig gesloten: er ontstaat een blokvormige pulstrein, waarvan het aantal pulsen geteld kan worden. Het tijdsverloop tussen sluiten van S_2 en openen van S_3 bepaald de integratietijd waarover de snelheid gemiddeld wordt.

Wil men zowel 10 minuten - als uurgemiddelden dan is dit op een van de volgende manieren te verwezenlijken:

- a. parallel nog een tellercircuit aan te brengen waarbij de tijdsduur tussen openen en sluiten ingesteld kan worden op een uur.
- b. een "accumulator" toe te passen d.i. een "opteller met geheugen" die een aantal malen 10 minuten gemiddelden optelt.

Extremen kunnen bepaald worden door een "beslisser" in het circuit in te voegen: iedere nieuwe tellerinhoud wordt vergeleken met de oude stand.

Wil men de maximale windsterkte over een uur dan wordt de hoogste tellerinhoud telkens bewaard en de andere als onbelangrijke "detail-informatie" verworpen.

Het zal de lezer duidelijk zijn dat dit soort meetmethoden alleen dan mogelijk zijn indien er "mathematisch" gedacht wordt bij het ontwerpen van besturingsschakelingen (Boole-algebra, 1).

6. Correlatie metingen m.b.v. een speciale rekenmachine

Het is geenszins de bedoeling hieronder uitvoerig in te gaan op het fysische fenomeen "stochastische signalen". De opzet van dit verslag is om meet- en daaraan gekoppelde rekenmethoden ("on-line digital computation") aan te geven. In de vorige paragraaf zijn reeds enkele eenvoudige toepassingen aangestipt, in deze paragraaf zullen geavanceerde correlatie technieken besproken worden. Stochastische signalen zijn onregelmatige, fluctuerende signalen en komen in de meteorologie voor in de vorm van druk-, temperatuur-, en windvariaties. Men spreekt in dit verband over "turbulent transport" en bedoeld daarmee het netto effect van onregelmatig bewegende luchtdeeltjes. Dit laatste laat zich op de volgende wijze meten. Men plaats op zekere afstand van elkaar twee meetvoelers. Bij massa transport kunnen dit twee snelle windmeters zijn. De reactie snelheid is in dit onderzoek belangrijker dan de nauwkeurigheid (zie par. 3). Plaats men deze meetvoelers in de stromingsrichting dan zal er een verband bestaan tussen de twee verkregen electrische signalen:

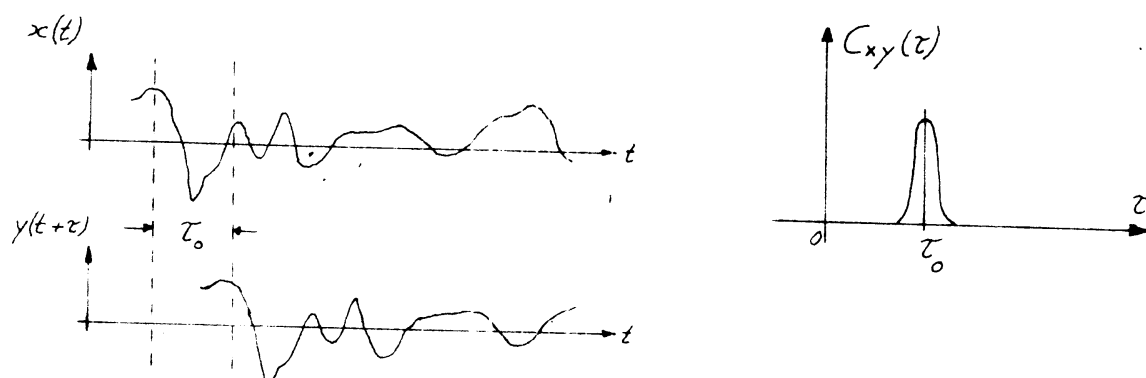


fig. 6.1. Registraties van twee meetvoelers in stromingsrichting.

Beide signalen vertonen een "ruisachtig" gedrag. Traditioneel kan men het tijdsverschil τ halen uit de analoge registraties van fig. 6.1. Kent men ook de afstand (d) tussen de twee meetvoelers dan volgt hieruit de transportsnelheid: $v = \tau/d$.

Opm.: a. Turbulent transport gaat gepaard met temperatuur fluctuaties, deze zijn gemakkelijk te meten (5).

b. Hierboven is meer gedacht aan een "sonische anemometer" waarbij ook een looptijd τ wordt gemeten. Hierover in het volgende meer.

Een hogere nauwkeurigheid is te bereiken door te middelen over een tijdsinterval T :

$$C_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t) \cdot y(t+\tau) dt = \overline{x(t)y(t+\tau)} \quad (6.1)$$

De "kruiscorrelatie" functie $C_{xy}(\tau)$ geeft de "mate van overeenkomst" weer tussen twee signalen.

6.1. Hoe is nu deze correlatie functie experimenteel te bepalen?

a. Op analoge wijze d.w.z. zowel $x(t)$ als $y(t)$ toevoeren aan een analoge rekenmachine en deze de vermenigvuldiging en integratie (over meettijd T) laten uitvoeren. Door $x(t)$ vertraagd toe te voeren vinden wij de $C_{xy}(\tau)$. Dit kan door het volledige (analoge) signaal $x(t)$ op te nemen en m.b.v. een verstelbare leeskop dit signaal τ seconden later weer uit te lezen, tegelijk met $y(t)$.

Het zal duidelijk zijn dat dit een bewerkelijke methode is en in nauwkeurigheid beperkt door de mechanische instabiliteiten van de magneetband recorder.

b. Door het meetsignaal digitaal te bemonsteren (2). Nemen wij N monsteringen in de meettijd T (zie fig. 2.1) dan is:

$$C_{xy}(\tau) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x(k\Delta t) \cdot y(k\Delta t + \tau) \quad (6.2)$$

Het gaat hierbij niet om een reconstructie van het signaal, maar om een statistische signaalverwerking. Aan formule (2.1) hoeft dus niet voldaan te worden, grotere statistische zekerheid wordt verkregen door N te vergroten.

c. Het meetsignaal polair te bemonsteren:

"Polariteits correlator" (3)

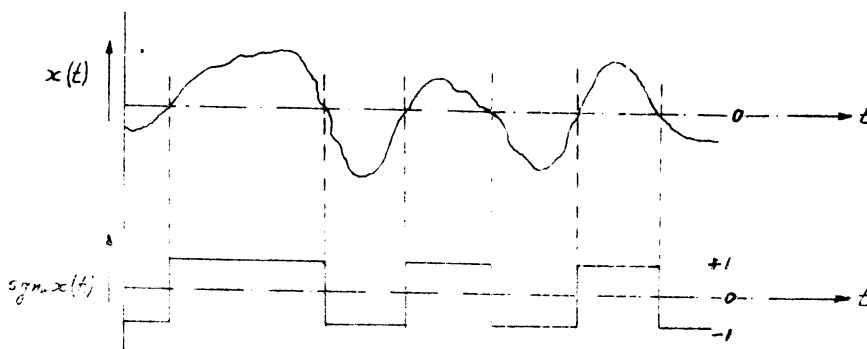


fig. 6.2. Modulatie van het meetsignaal.

Door de gelijkspanning component uit het meetsignaal te filteren krijgen wij een om de nullijn slingerend signaal. De nuldoorgangen kunnen nu gebruikt worden om het turbulentie gedrag vast te leggen. D.m.v. een twee standen schakeling levert iedere meetwaarde een "bit" aan informatie (zie fig. 6.2):

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T \text{sgn } x(t) \cdot \text{sgn } y(t+k\Delta\tau) \quad (6.2)$$

waarin: $\text{sgn } x(t) = +1$ voor $x(t) > 0$

$\text{sgn } x(t) = -1$ voor $x(t) < 0$

Bij een "Gauss" proces laat zich de exacte correlatie functie $C_{xy}(\tau)$ berekenen uit de "polariteits" correlatie functie $R_{xy}(\tau)$, doordat daarbij ook de amplitude verdeling - waarvan wij hier gebruik maken - een Gaussisch karakter bezit (3).

Doordat nu verder gewerkt kan worden met binair "0" of "1", worden de bewerkingen sterk vereenvoudigd. De binaire informatie van het $x(t)$ signaal wordt daarbij aan een "schuifregister" toegevoerd en om de $\Delta\tau$ seconden doorgeschoven. In ieder k de bemonsterings interval worden de "opgeslagen $x(t)$ bits" vergeleken met een " $y(t+k\Delta\tau)$ bit". Dit gebeurt in zgn. coïncidentie schakelingen, de uitkomsten hiervan worden aan "accumulatoren" toegevoerd (hiertoe kan een RC-netwerk dienen, 5). Zodra $k=N$ (einde meettijd T) worden de "geheugens" van de k accumulatoren achter elkaar uitgelezen. De polariteitscorrelatie functie kan dan zichtbaar gemaakt worden op een oscilloscoop. Er verschijnt daarbij een puntjeslijn omdat om de $\Delta\tau$ seconde de $R_{xy}(\tau)$ zichtbaar wordt. Door geïntegreerde schakelingen toe te passen is de waarde $\Delta\tau$ zeer klein (orde 10 ns) te kiezen en N behoorlijk groot (orde 250 à 1000).

6.2. Hoe ziet er zo'n correlatie functie uit?

Wij kunnen ook het verband in een en hetzelfde signaal bestuderen, hoe hangt $x(t)$ samen met $x(t+\tau)$: auto correlatie functie $C_{xx}(\tau)$.

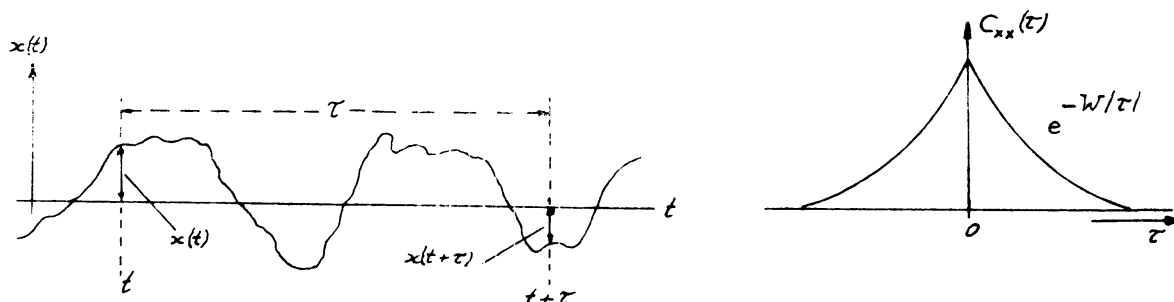


fig. 6.3. Overeenkomst in een "stochastisch" signaal.

Gemakkelijk is in te zien dat $C_{xx}(0) = 1$ = volledige overeenkomst en $C_{xx}(\infty) = 0$ = geen samenhang.

Een periodiek signaal $x(t)$ levert weer een periodieke correlatie functie op: $C_{xx}(0) = C_{xx}(nT) = 1$ en $C_{xx}(\frac{1}{2}nT) = 0$ waarin T de periode voorstelt en n een geheel getal is.

"Witte ruis" vertoont geen enkel samenhang dit betekent dat de $C_{xx}(\tau)$ een smalle piek oplevert rondom $\tau=0$. Daarentegen is de breedte van een periodiek signaal even breed als de periode T van dat signaal. Algemeen geldt hoe groter de bandbreedte van het signaal des te smaller de correlatie functie. Deze neemt ongeveer exponentieel met de bandbreedte W af. Auto correlatie meting levert dus een maat voor de bandbreedte en is daarom een antwoord op formule 2.1.

Bovenstaande eigenschappen leveren ons de mogelijkheid om periodieke signalen, die verzonken zijn in ruis, te detecteren. Ook is het mogelijk om de looptijd (= transmissie vertraging) tussen een zender en ontvanger te meten al wordt er in het communicatie kanaal nog zoveel storing toegevoegd.

Dit laatste levert de mogelijkheid om zeer nauwkeurig de geluidssnelheid te meten. M.b.v. correlatie technieken is een "sonische anemometer" te ontwikkelen die snel en gevoelig het turbulentiëpatroon van de grenslaag kan detecteren.

Het gebruik van een "pseudo ruis", ook wel "maximum lengte reeks" genoemd, generator als zender levert aan de ontvanger zijde duidelijk gedefiniëerde correlatie pieken op.

Zodra de digitale registraties van de "meetmasten" betrouwbaar werken - door toepassing van de Boole-algebra (1) - kan met deze geavanceerde apparatuur gestart worden.

Om spraakverwarring te voorkomen: boven beschreven correlatie technieken worden ook wel met de term "data-reductie" aangegeven. Een voorbeeld hiervan is de analoge methode (8).

7. Conclusies en aanbevelingen

Traditioneel worden veel meteorologische gegevens analoog geregistreerd op mechanische schrijvers. Daarnaast beschikt het K.N.M.I., sinds twee jaar, over een universele digitale rekenmachine.

Om nu efficiënt gebruik te kunnen maken van deze rekenmachine is het noodzakelijk de informatie ook digitaal aan te bieden. In dit verslag is getracht duidelijk te maken dat:

- a. het ongemotiveerd is aan analoge registraties de voorkeur te geven;
- b. er, op dit moment, geavanceerde digitale meettechnieken bestaan.

De toepassing van deze moderne meet- en rekentechnieken maakt het noodzakelijk een meetsysteem volledig opnieuw te ontwerpen ("redesign"). Hierbij moet aan de volgende eisen voldaan worden:

- a. het nauwgezet evalueren van "research" projecten;
- b. het kritisch toepassen van mathematische modellen in de ontwerpfase (1).

ad. a. M.b.v. kortdurende detailprojecten kan nagegaan worden of er een voorkeur bestaat voor bv. momentane waarden (op welke tijdstippen), gemiddelden (over welk tijdsinterval) of extreme waarden (per uur of per dag). Deze detailprojecten moeten afgesloten zijn voor er aan jarenlange "meetreeksen" begonnen kan worden.

De uitspraak: "neem alle waarden maar op en wij bepalen later wel wat wij kunnen gebruiken" is uiteraard in de praktijk moeilijk (of helemaal niet) realiseerbaar. Hopelijk heb ik een en ander in dit verslag duidelijk kunnen maken. In dit verband zal het duidelijk zijn dat er een nauwe samenwerking tussen de betrokken afdelingen nodig is om een evaluatie mogelijk te maken.

ad b. Bij langdurige meetreeksen is de toepassing van een speciale rekenmachine ("special purpose computer") efficiënter dan een universele rekenmachine (kortweg "computer").

Een voorbeeld van zo'n speciaal rekentuig is gegeven in paragraaf 6.1.c.: de polariteits correlator.

Ter informatie zij hier nog vermeld dat op het K.N.M.I. een "mechanische" (magneetband, schrijfkop en meerdere leeskoppen) versie is ontwikkeld (4). Verder is er bij de Dodewaard kernenergie centrale een volledig elektronische uitvoering in gebruik, die gebouwd is door de "Technisch Fysische Dienst" van de TH-TNO in Delft.

Door gebruik te maken van deze polariteits correlator met een maximum lengte reeks generator is een sonische anemometer te ontwerpen. De nauwkeurigheid en gevoeligheid kan daarbij hoog zijn vanwege het uitmiddelen van de ruisbijdrage.

Literatuur opgave

1. Van Gorp, J.J.M.
Logica in electronica.
KNMI-verslag V-228.
2. Rex, R.L. and Roberts, G.T.
Correlation, Signal Averaging and Probability Analysis.
Hewlett-Packard Journal 21 (1969), no. 3.
3. Veltman, B.P. Th. und Kwakernaak, H.
Theorie und Technik der Polariteits Korrelation.
Regelungstechnik 9 (1961), 357-364.
4. Vesseur, H.J.A.
A correlation apparatus for the meas. of drift in the ionosphere.
J. Atm. and Terr. Phys. 32 (1970), 829-835.
5. Termaat, K.P.
Watersnelheids meting m.b.v. kruiscorrelatie.
Ned. Tijdschr. voor Nat. 36 (1970), 7-11.
6. Oberman, R.M.M.
Automatisch Meetnet voor Luchtverontreiniging.
T.H. Delft, afd. Elektrotechniek, nr. 051560-44(1970)4.
7. Van Galen, J.
Spectraalanalyse van tijdreeksen.
KNMI-verslag V-212.
8. Businger, J.A.
Data reduction technique.
in: Haugen D.A. (ed).
Project Prairie Grass, A Field Program in diffusion, Volume III.