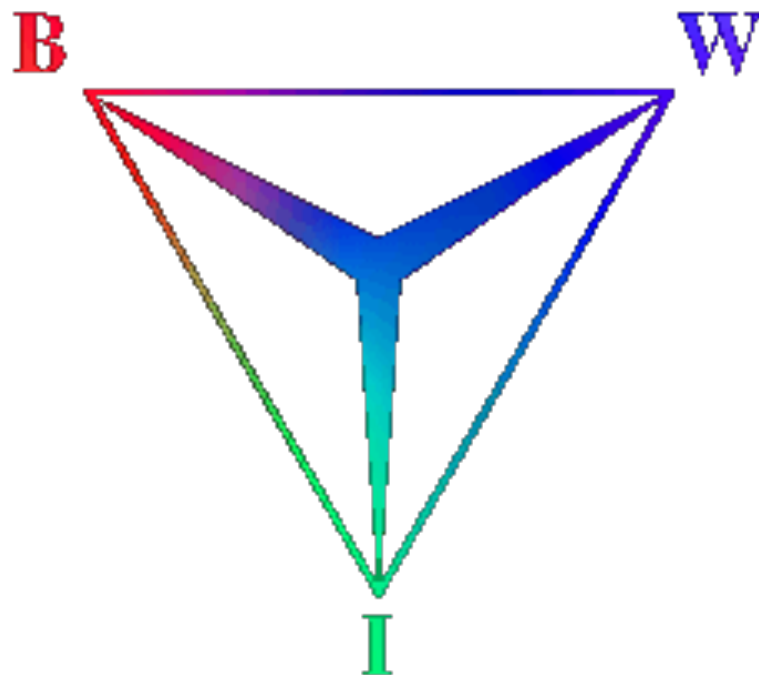


Mobiele Adhoc NETwerken

(MANETs)



Ing. Ronald van der Meulen
BedrijfsWiskunde & Informatica

Afkortingen

- 0G (Traditional wireless mobile networks)
- 1G (First Generation mobile networks)
- 2G (Second Generation mobile networks)
- 2.5G (Second-and-a-half Generation mobile networks)
- 3G (Third Generation mobile networks)
- 4G (Fourth Generation mobile networks)
- AMPS (Advanced Mobile Phone Systems)
- AODV (Adhoc On-demand Distance Vector)
- ASR (Associativity Based Routing)
- CBRP (Cluster Based Routing Protocol)
- CDMA (Code Division Multiple Access)
- CGSR (Clusterhead Gateway Switch Routing)
- DSDV (Destination-Sequenced Distance-Vector)
- DSR (Dynamic Source Routing)
- EGP (External Gateway Protocol)
- FDD (Frequent Division Duplex)
- FDMA (Frequency Division Multiple Access)
- FSR (Fisheye State Routing)
- GPRS (Global Packet Radio Service)
- GPS (Global Positioning System)
- GSM (Global System for Communication)
- GSR (Global State Routing)
- HSR (Hierarchical State Routing)
- IGP (Interior Gateway Protocol)
- IGRP (Interior Gateway Routing Protocol)
- LAN (Local Area Network)
- MAN (Metropolitan Area Network)
- MANET (Mobile Adhoc NETWORK)
- MMS (Multimedia Message Service)
- NAMPS (Narrowband Advanced Mobile Phone Systems)
- NMT (Nordic Mobile Telephone)
- NNT (Nordic Telephone & Telegraph)
- OLSR (Optimized Link State Routing Protocol)
- OSPF (Open Shortest Path First)
- PAN (Personal Area Network)
- PDA (Personal Digital Assistant)
- PSTN (Public Switched Telephone Network)
- RIP (Routing Interior Protocol)
- SMS (Short Message Service)
- SSR (Signal Stability-Based Adaptive Routing)
- TACS (Total Action Communication System)
- TDD (Time Division Duplex)
- TDMA (Time Division Multiple Access)
- TORA (Temporally Ordered Routing Algorithm)
- UMTS (Universal Mobile Telecommunication Systems)
- WAN (Wide Area Network)
- WLAN (Wireless Local Area Network)

- WMAN (Wireless Metropolitan Area Network)
- WRP (Wireless Routing Protocol)
- ZHLS (Zone-based Hierarchical Link State)

Voorwoord

Bij het schrijven van dit BWI-werkstuk ligt de nadruk op een combinatie van Bedrijfsgerichte-, Wiskundige- en Informatica-aspecten van de studie. Mijn interesse voor het onderwerp Mobiele Adhoc NETwerken (MANETs) kwam tot stand door het volgen van de cursus Performance Analysis of Communication Networks (PACN) en door artikelen te hebben geraadpleegd naar aanleiding van deze cursus.

In bestaande mobiele netwerken wordt het dataverkeer getransporteerd via vaste basisstations, terwijl het dataverkeer in een MANET zonder vaste basisstations wordt getransporteerd. Een knooppunt in de bestaande mobiele netwerken functioneert zowel als zender als ontvanger met behulp van vaste basisstations. In een MANET heeft een knooppunt ook de functie van zender en ontvanger, maar dan zonder hulp van vaste basisstations. Universiteiten doen volop onderzoek naar het functioneren van MANETs. De voordelen van een MANET ten opzichte van de bestaande mobiele netwerken zijn

- flexibiliteit,
- lage investeringskosten vanwege het functioneren zonder vaste communicatiestructuur (autonome karakter),
- snel en effectief inzetbaar in geval van noodscenario's, zoals natuurrampen en reddingsoperaties.

Een aantal mensen wil ik bedanken voor hun bijdrage aan het BWI-werkstuk. Ten eerste Prof. Dr. Rob van der Mei die door zijn enthousiasme mij altijd weer verder heeft geholpen met het BWI-werkstuk. Ten tweede Dr. Ir. René Swarttouw voor zijn altijd weer luisterend oor. Ten derde mijn ouders en vrienden die me voortdurend gestimuleerd hebben door te gaan met studeren.

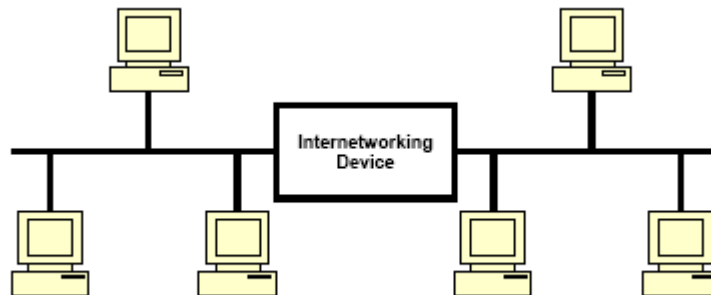
Ing. Ronald van der Meulen
April 2005
Amstelveen

Inhoudsopgave

AFKORTINGEN	3
INLEIDING	7
HOOFDSTUK 1: EVOLUTIE MOBIELE NETWERKEN	9
HOOFDSTUK 2: ANALOGE EN DIGITALE COMMUNICATIE	11
2.1 VERSCHIL TUSSEN ANALOGE EN DIGITALE SIGNALLEN	11
2.2 ACCESS PROTOCOLLEN	12
HOOFDSTUK 3: ARCHITECTUUR MOBIELE NETWERKEN	15
3.1 COMMUNICATIESTRUCTUUR VAN BESTAANDE MOBIELE NETWERKEN	15
3.2 ROUTERINGSPROTOCOLLEN IN BESTAANDE MOBIELE NETWERKEN	17
3.3 COMMUNICATIESTRUCTUUR VAN EEN MANET	18
3.4 ROUTERINGSPROTOCOLLEN IN EEN MANET	19
HOOFDSTUK 4: TOEPASSINGSGBIEDEN MANETS	21
4.1 MILITAIRE OPERATIES	21
4.2 REDDINGSOPERATIES	21
4.3 BEVEILIGING IN GEBOUWEN	22
4.4 VliegBewegingen Bij Landingsbanen	22
4.5 INTELLIGENTE TRANSPORTSYSTEMEN	22
HOOFDSTUK 5: COMMUNICATIEPATRONEN IN MANETS	24
HOOFDSTUK 6: MODEL BEDEKKINGSPROBLEEM IN MANETS	25
6.1 MODELBSCHRIJVING EENDIMENSIONALE RUIMTE	25
6.1.1 <i>Cumulatieve verdelingsfuncties</i>	26
6.2 MODELBSCHRIJVING TWEEDIMENSIONALE RUIMTE	30
6.2.1 <i>Simulatieresultaten onderzoeksvragen</i>	31
CONCLUSIES	34
EENDIMENSIONALE- EN TWEEDIMENSIONALE RUIMTE	34
TOEPASSINGEN	34
BIJLAGEN	36
SCRIPTS VOOR DE SIMULATIES IN 2-DIM. RUIMTE	36
GRAFIEKEN ONDERZOEKSVRAAG 1	41
GRAFIEKEN ONDERZOEKSVRAAG 2	43
BIBLIOGRAFIE	46
LIJST MET FIGUREN EN GRAFIEKEN	47

Inleiding

Een communicatienetwerk bestaat uit een aantal knooppunten die al dan niet met elkaar verbonden zijn. Voortaan worden knooppunten verder als mobiele stations aangeduid. Communicatienetwerken kunnen verbonden zijn met andere communicatienetwerken en worden onderverdeeld in topologie, routeringsprotocollen, reikwijdte (uitgestrektheid) en eigendom (privé en openbaar). Bekende topologieën zijn onder andere het point-to-point verbinding, sternetwerk, ringnetwerk, busnetwerk en maasnetwerk. In *figuur 1* wordt als voorbeeld een busnetwerk getoond.



Figuur 1 Busnetwerk

Het telefoonnetwerk is een voorbeeld van een openbaar communicatienetwerk. Bekende computernetwerken zijn bijvoorbeeld het Local Area Network (LAN) en het Wide Area Network (WAN). Dergelijke netwerken worden genoemd naar hun uitgestrektheid. Zo wordt het Local Area Network (LAN) gebruikt in kleine ondernemingen, terwijl een Wide Area Network door grote multinationals wordt toegepast. Vele tussenvormen zoals, Metropolitan Area Network (MAN), Home Area Network (HAN) en Personal Area Network (PAN) en zelfs Body Area Networks (BAN) zijn mogelijk. Internet is een voorbeeld van een openbaar Global Area Network (GAN) waar iedereen met een computer toegang tot heeft.

Een MANET is een mobiel netwerk dat geen vaste topologie heeft omdat mobiele stations voortdurend van plaats veranderen. In tegenstelling tot bestaande mobiele netwerken (GSM, GPRS, UMTS) kan een MANET autonoom functioneren, zonder afhankelijk te zijn van vaste basisstations. Toch kan een MANET eenvoudig worden aangesloten op het openbare telefoonnet, datanet, computernetwerk, kabelnet en glasvezelnetwerk. Verder zijn MANETs ideaal in situaties

- waar het onmogelijk is een vaste communicatiestructuur op te zetten, vanwege de hoge kosten of de kwetsbaarheid van het gebied,
- die van korte duur zijn, zoals reddingsoperaties,
- waar de vaste communicatiestructuur vernield is, zoals bijvoorbeeld de recente zeebeving in Zuid-Oost Azië en de oorlog in Irak.

MANETs worden al in de praktijk toegepast, maar nog belangrijker is het om onderzoek te doen naar het functioneren en de performance van MANETs in bovengenoemde situaties.

Factoren die een rol spelen bij het goed functioneren van een MANET zijn bijvoorbeeld

- het aantal mobiele stations in het communicatienetwerk,
- de connectiviteit van de mobiele stations,
- de capaciteit van een mobiel station,
- fractie van eenrichtingsbewegingen,
- inzicht in de communicatiepatronen van het dataverkeer,
- beweeglijkheid van de mobiele stations,
- fractie “slapende” mobiele stations,
- fractie disfunctionerende mobiele stations.

In dit rapport wordt vooral gekeken naar de connectiviteit in een MANET. De connectiviteit is een maat voor de betrouwbaarheid van de verbinding tussen mobiele stations. Deze is in sommige gevallen zeer slecht, vanwege de beweeglijkheid van de mobiele stations en het communiceren zonder vaste basisstations. In dit rapport zal onderzocht worden hoe mobiele stations in een MANET zonder vaste basisstations verbinding maken. In de literatuur staat dit bekend als het bedekkingsprobleem. Met behulp van een tweetal modellen in de eendimensionale- en tweedimensionale ruimte wordt een nader licht geworpen op het bedekkingsprobleem.

De onderverdeling van de hoofdstukken in dit rapport is de volgende

- Hoofdstuk 1 gaat in op de evolutie van mobiele netwerken,
- Hoofdstuk 2 legt het verschil uit tussen analoge en digitale communicatie en gaat in op eventuele overcapaciteit van mobiele netwerken,
- Hoofdstuk 3 behandelt de communicatiestructuur en routeringsprotocollen in mobiele netwerken,
- Hoofdstuk 4 behandelt verschillende toepassingsgebieden van MANETs,
- Hoofdstuk 5 geeft een analyse over de communicatiepatronen van mobiele stations in een MANET,
- Hoofdstuk 6 behandelt met behulp van een tweetal modellen het bedekkingsprobleem in de eendimensionale- en tweedimensionale ruimte,
- Het laatste hoofdstuk geeft conclusies naar aanleiding van de resultaten van deze modellen en de toepassingen beschreven in hoofdstuk 4,
- Het rapport wordt afgesloten met een bijlage over gebruikte scripts en resultaten van grafieken.

Hoofdstuk 1: Evolutie mobiele netwerken

De eerste mobiele netwerken hebben vanaf de jaren zeventig een ongekende groei doorgemaakt. In de komende tien jaar zal een grote toename te verwachten zijn in het gebruik van draadloos dataverkeer, waardoor mobiele netwerken steeds meer aan terrein zullen winnen. Deze toename is vooral te wijten aan het feit dat mensen in het dagelijks leven steeds mobieler worden. Werd in het begin alleen gebruik gemaakt van spraak, vandaag de dag kunnen diensten, zoals Short Message Service (SMS) en Multimedia Message Service (MMS) via mobiele netwerken worden aangeboden. Mobiele netwerken worden in de literatuur onderverdeeld in verschillende generaties netwerken. In dit hoofdstuk wordt voor iedere generatie de belangrijkste systemen opgenoemd. Voor de architectuur van deze systemen wordt verwezen naar hoofdstuk 3.

De eerste mobiele netwerken waren onder andere de draadloze telefoonsystemen. Bij draadloze telefoonsystemen is de mobiele telefoon via een draadloze link met het vaste basisstation verbonden. Het vaste basisstation is met het openbare telefoonnet (PSTN) verbonden. Het bereik ligt hier in orde van grootte van 100-300 meter. Het dataverkeer vindt plaats in de vorm van spraak, waarbij gebruik wordt gemaakt van analoge communicatie (zie hoofdstuk 2 voor meer details).

Onder de eerste generatie mobiele netwerken vallen bijvoorbeeld het Advanced Mobile Phone Systems (AMPS) uit de Verenigde Staten. Total Access Communication Systems (TACS) uit Engeland en Nordic Mobile Telephone System (NMT) uit Scandinavië. Deze systemen maken gebruik van een analogo cellulair netwerk en bestaan uit drie onderdelen: een vast basisstation, Mobile Telephone Switching Office (MTSO) en een mobiel station. Zoals de naam al doet vermoeden, wordt hier gebruik gemaakt van analoge communicatie.

Onder de tweede generatie mobiele netwerken vallen onder anderen Narrowband Advanced Mobile Phone System (NAMPS) door Motorola. Global System for Mobile Communication (GSM) door Nokia en IS-95 door Qualcomm. Andere bekende systemen zijn het Japanse Digital Cellular (JDC), CT-2 in Europa/ Azië, CT-3 in Zweden en DECT in Europa. Kleine tekstberichten (SMS) kunnen via de mobiele telefoon over het GSM-netwerk worden verstuurd. In deze generatie mobiele netwerken heeft de overgang plaatsgevonden van analoge communicatie naar digitale communicatie.

De belangrijkste 2.5^{de} generatie mobiele netwerk is het GPRS-netwerk (General Packet Radio Service). Dit netwerk is in feite een uitbreiding van het GSM-netwerk, vandaar de naam 2.5^{de} generatie. Met behulp van het Wireless Application Protocol (WAP) kan met de mobiele telefoon toegang verkregen worden tot het internet. In Japan is hiervoor het zogenaamde I-mode ontwikkeld. Met behulp van de 2.5^{de} generatie mobiele netwerken kunnen plaatjes, video en audio (MMS) worden verstuurd. Het is zelfs mogelijk om te surfen over het internet, mits de internetpagina's hiervoor geautoriseerd zijn. Het dataverkeer wordt via radiogolven in digitaal formaat getransporteerd.

De belangrijkste derde generatie mobiele netwerken zijn Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) in Europa door Nokia/ Ericsson en het CDMA-2000 in Noord-Amerika door Lucent/QuadComm. Hier voorafgaand is een samenwerkingsverband gestart onder de noemer 3^{de} Generation Partnership Project (3GPP) waar Europa, Japan, Korea, Verenigde Staten en China aan mee hebben gedaan om een universele standaard te ontwikkelen. In Nederland zijn 2 jaar geleden de UMTS frequenties voor exorbitant hoge

bedragen verkocht aan de telecommunicatiebedrijven. Op dit moment wordt het UMTS netwerk in Nederland in snel tempo aangelegd om deze investering zo snel mogelijk terug te verdienen. Met behulp van de derde generatie mobiele netwerken is, naast het versturen van kleine tekstberichten en spraak, mogelijk om videoconferenties te realiseren. Het dataverkeer vindt plaats via digitale communicatie.

Voor de 4^{de} generatie mobiele netwerken zijn onder andere Mobile Adhoc Netwerken (MANET), HomeRF (mobiele netwerken in en om het huis) en draadloze sensortechnieken (mobiele netwerken binnen de robotica) bekende voorbeelden. Tevens kunnen draadloze computernetwerken zoals WLAN, WPAN (Bluetooth) en WHAN tot de vierde generatie mobiele netwerken worden gerekend. Van deze mobiele netwerken zal in dit rapport de nadruk worden gelegd op een MANET. Ook hier vindt het dataverkeer plaats via digitale communicatie.

4G	MANET	HomeRF	WMAN Sensor	WLAN WPAN
3G	UMTS	CDMA2000	3GPP	
2.5G	GPRS (MMS)	WAP	I-mode	
2G	NAMPS DECS/JDC	GSM (SMS)	IS-95	CT-2/CT-3
1G	AMPS	TACS	NMT	

Figuur 2 Generaties mobiele netwerken

De draadloze telefoonsystemen, 1G, 2G, 2.5G en 3G worden verder in dit rapport als de bestaande mobiele netwerken aangeduid. In dit hoofdstuk kwam duidelijk het onderscheid naar voren tussen analoge en digitale communicatie. Zo maken de draadloze telefoonsystemen en 1G gebruik van analoge communicatie, terwijl 2G, 2.5G, 3G en 4G gebruik maken van digitale communicatie. In het volgende hoofdstuk zal dieper op dit verschil worden ingegaan.

Hoofdstuk 2: Analoge en digitale communicatie

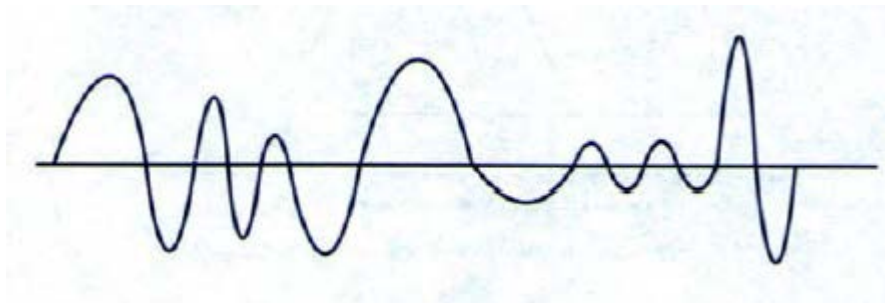
Met behulp van mobiele netwerken kunnen diensten als SMS, MMS, videoconferenties en web-browsing worden aangeboden. Het dataverkeer (tekst, geluid en video) dat hiermee gemoeid gaat vindt plaats via elektrische geleiders (koperdraad), telefoonlijnen, radiogolven, satellietverbindingen en lichtstralen (glasvezel). In dit hoofdstuk wordt een beeld gegeven hoe de communicatie verloopt in mobiele netwerken. De eerste paragraaf zal ingaan op het verschil tussen analoge en digitale signalen. In de tweede paragraaf wordt uitgelegd hoe dataverkeer tijdelijk het maximale capaciteit van het mobiele netwerk kan overschrijden.

2.1 Verschil tussen analoge en digitale signalen

Bij analoge communicatie worden geluidsgolven van een stem omgezet naar een analogoog elektrisch signaal dat vervolgens zonder encryptie (beveiliging) de ruimte in wordt gestuurd. De volgende kenmerken karakteriseren een signaal

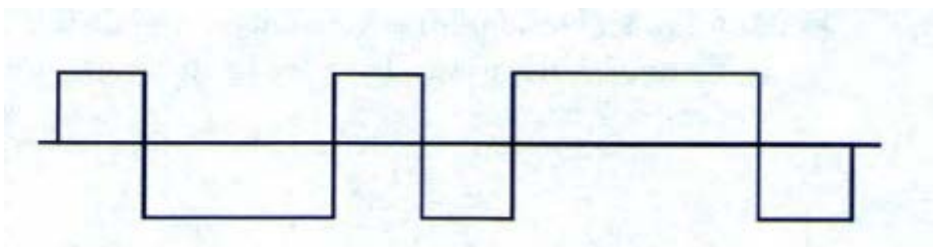
- amplitude (maat voor de sterkte van de golf),
- frequentie (snelheid waarmee de vorm van de golf verandert),
- fase (tijdstip waarmee een signaal begint en eindigt).

Analoge signalen kunnen het beste worden weergegeven als een golf die een groot aantal verschillende vormen kan aannemen. De golf wijzigt continu en heeft steeds andere kenmerken. Vooral de amplitude van de golf is verantwoordelijk voor de vele verschillende vormen. Een analogoog signaal is een som van golven en wordt meestal gekarakteriseerd door een sinus- of cosinusfunctie.



Figuur 3 Analogoog signaal

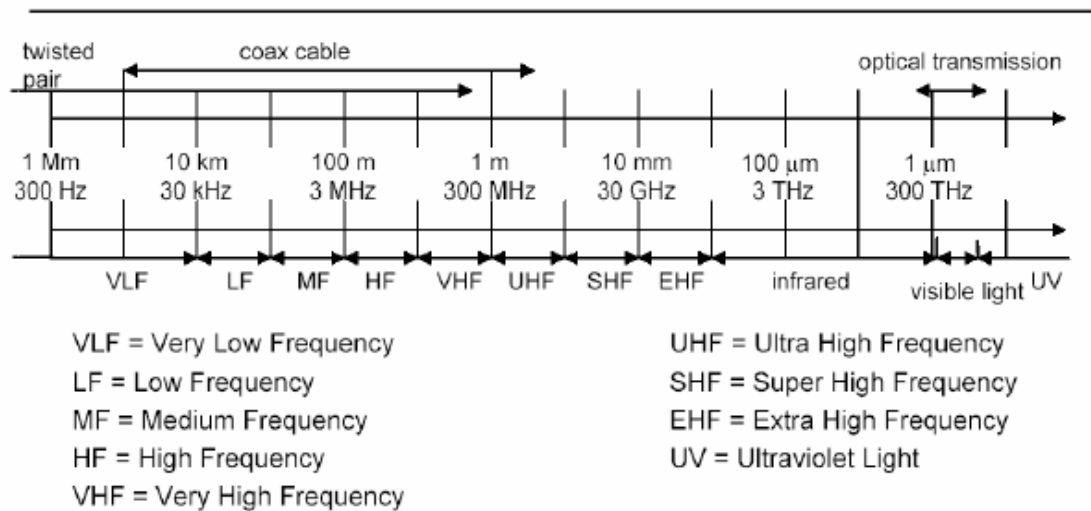
Bij digitale communicatie worden analoge signalen omgezet naar een digitaal signaal (nullen en enen) alvorens deze kunnen worden verstuurd. Een digitaal signaal kent geen ononderbroken signaal en wijzigt daardoor niet vaak van vorm.



Figuur 4 Digitaal signaal

De prestatie van een mobiel netwerk wordt mede bepaald door de kwaliteit van het signaal. Factoren die de kwaliteit van het signaal kunnen doen afnemen zijn bijvoorbeeld obstakels en de beweeglijkheid van mobiele stations. Obstakels kunnen bijvoorbeeld tunnels, heuvels en

het interne gedeelte van grote gebouwen zijn. Op bepaalde plekken in het bèta gebouw van de VU is de ontvangst van de mobiele telefoon slecht te noemen vanwege de gebruikte materialen. Door de bewegelijkheid van de mobiele stations in een MANET wijzigt regelmatig de frequentie van het signaal. Analoge en digitale signalen hebben over het algemeen een bepaald bereik aan frequenties. Ook wordt wel gesproken over de bandbreedte van het signaal. Hieronder wordt een overzicht gegeven van het bereik van het signaal, het zogenaamde frequentiespectrum.



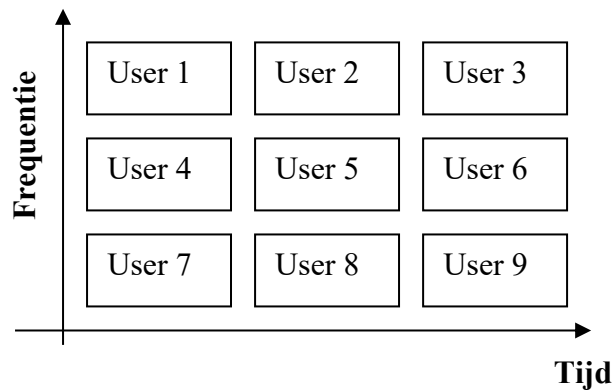
Figuur 5 Overzicht frequentiespectrum

Uit het frequentiespectrum is op te maken dat frequenties worden gemeten in Hertz en een bandbreedte hebben die loopt van 300Hz tot en met 300 THz. Zo hebben de klassieke draadloze telefoonsystemen een bandbreedte van 800-900Mhz. Een GSM netwerk uit de 2G heeft bij *uplink* een bandbreedte van 890-915MHz en bij *downlink* een bandbreedte van 935-960MHz. De termen *uplink* en *downlink* worden in het volgende hoofdstuk verder uitgelegd. Het dataverkeer via elektrische geleiders heeft een bandbreedte tussen de 30kHz en 300MHz. Terwijl lichtstralen meer dan 300Thz ter beschikking hebben. Dit is een verklaring voor het feit dat mobiele netwerken uit de hogere generaties mobiele netwerken een hogere capaciteit voor het dataverkeer ter beschikking hebben. Naast het gebruik van het transportmedium zijn ook een aantal *access protocols* ontwikkeld die voorkomen dat verschillende gebruikers elkaar in de weg zitten, als ze op hetzelfde moment van het mobiele netwerk gebruik willen maken. In de volgende paragraaf worden een aantal van deze technieken besproken.

2.2 Access protocollen

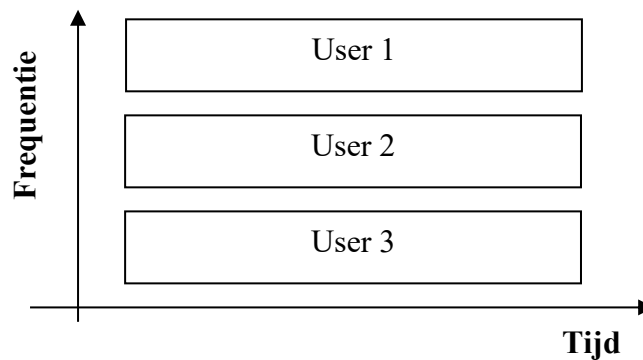
Op bepaalde momenten van de dag kan het dataverkeer tijdelijk de maximale capaciteit van het mobiele netwerk overschrijden. Om hier goed mee om te gaan zijn nieuwe technieken ontwikkeld om hiermee om te gaan. Deze technieken staan bekend onder de noemer *multiple access technieken*. De volgende drie technieken vallen hieronder,

- TDMA wordt gebruikt in digitale cellulaire systemen en PCS systemen en is in feite een combinatie van Frequency Division Multiplexing (FDM) en Time Division Multiplexing (TDM). Bij TDMA wordt de bandbreedte van een signaal onderverdeeld in een aantal tijdvakken, zodat meerdere gebruikers op verschillende tijdstippen gebruik kunnen maken van dezelfde frequentie (zie figuur 6).



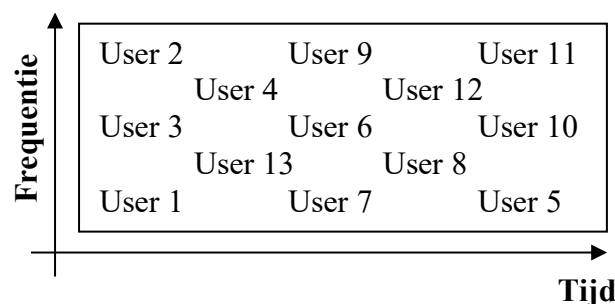
Figuur 6 Time Division Multiple Access

- FDMA wordt gebruikt in analoge cellulaire systemen, waarbij de bandbreedte van het signaal in gedeelten wordt opgesplitst, zodat meerdere gebruikers op verschillende bandbreedtes gebruik kunnen maken van dezelfde frequentie (zie figuur 7).



Figuur 7 Frequency Division Multiple Access

- Bij CDMA wordt informatie over de hele bandbreedte van een signaal uitgespreid. Hierdoor ontstaan unieke digitale codes waarbij in tegenstelling tot radiofrequenties en-of frequentiekanalen verschillende signalen ontstaan. Beide mobiele stations ontvangen hetzelfde signaal vanwege de unieke code (zie figuur 8). Dit principe staat bekend als *universal frequency reuse*. Een nadeel is dat CDMA alleen gebruik maakt van digitale signalen. Helaas hebben niet alle landen de beschikking over digitale cellulaire systemen, zodat deze ontwikkelingen daar nog lang op zich zullen laten wachten.



Figuur 8 Code Division Multiple Access

Verder zijn technieken ontwikkeld die ervoor zorgen dat dezelfde frequentie gebruikt kan worden voor het tegelijk verzenden en ontvangen van dataverkeer, de zogenaamde duplex (tweerichtingen)-technieken. De volgende twee technieken zijn hiervoor ontwikkeld

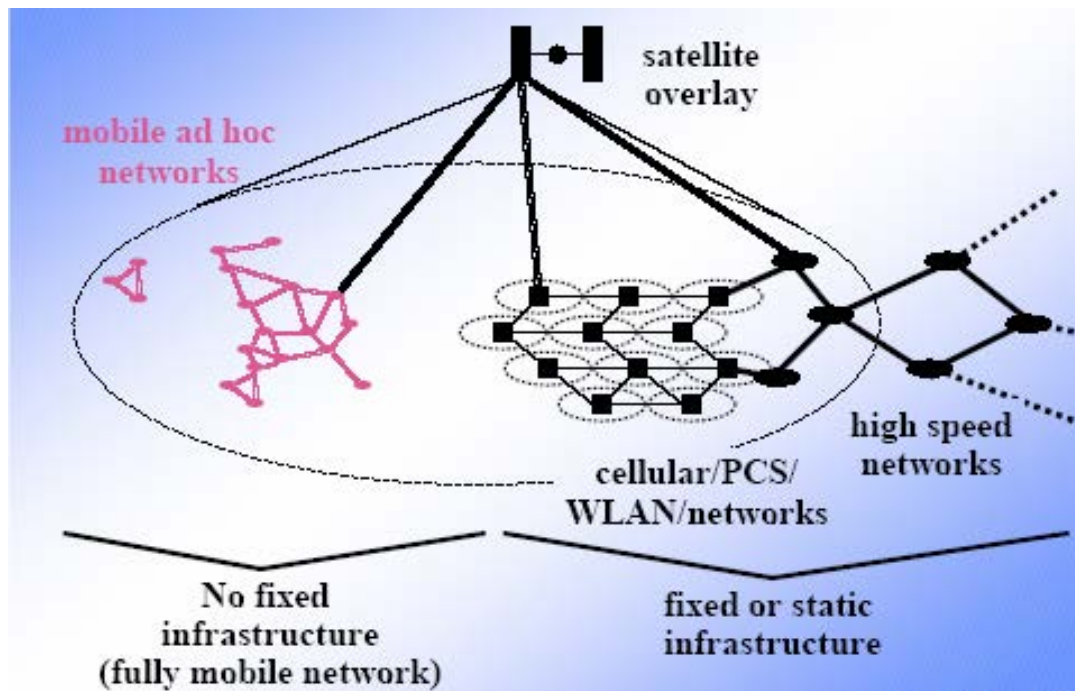
- FDD (Frequency Division Duplex). Hierbij wordt dataverkeer tegelijk verzonden en ontvangen op dezelfde frequentie,
- TDD (Time Division Duplex). Hierbij wordt afwisselend dataverkeer verzonden en ontvangen op dezelfde frequentie.

Met behulp van *multiple access* en *duplex* technieken kan enerzijds overcapaciteit in het mobiele netwerk worden gerealiseerd en anderzijds kan efficiënter omgesprongen worden met de beschikbare frequenties. Zo wordt in een GSM-netwerk (2G) gebruik gemaakt van TDMA en FDD.

In het volgende hoofdstuk wordt gekeken naar de architectuur van bestaande mobiele netwerken en MANETs.

Hoofdstuk 3: Architectuur mobiele netwerken

Het grootste verschil tussen de bestaande mobiele netwerken en MANETs is de manier waarop het dataverkeer wordt verstuurd. Bij de bestaande mobiele netwerken wordt het dataverkeer door mobiele stations met behulp van een vaste communicatiestructuur verstuurd, terwijl in een MANET het dataverkeer door mobiele stations juist autonoom, dus zonder vaste communicatiestructuur kan worden verstuurd. In *figuur 9* is dit verschil duidelijk te zien.



Figuur 9 Mobiele netwerken met en zonder vaste communicatiestructuur

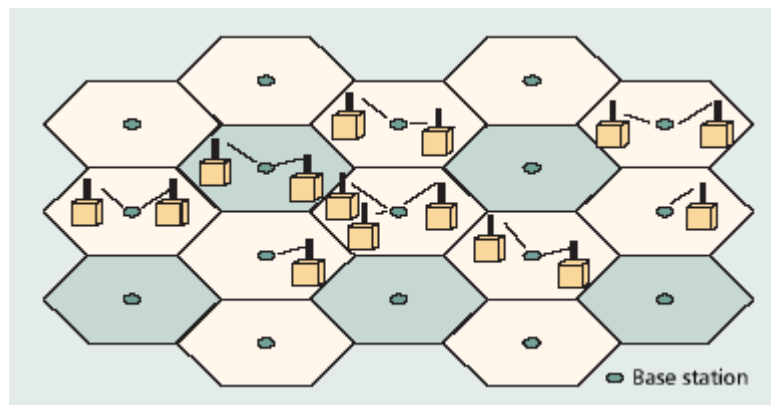
Vaak heeft een vaste communicatiestructuur de vorm van een cellulair netwerk. Andere vormen zijn mogelijk en dit komt vooral door de ligging en de functie van het mobiele netwerk. Hier wordt verder niet op ingegaan. Verderop in dit hoofdstuk wordt aandacht besteedt aan het cellulaire netwerk. Alle mobiele netwerken kunnen aangesloten worden op een satellietverbinding, zodat met bijvoorbeeld het Global Positioning System (GPS) precies kan worden nagegaan waar een mobiel station zich bevindt. In dit hoofdstuk zal voor elke generatie mobiele netwerken de communicatiestructuur en de manier van transport van het dataverkeer, de zogenaamde routeringsprotocollen, worden besproken. Doordat mobiele stations in een MANET communiceren zonder vaste basisstations kunnen de routeringsprotocollen van de bestaande mobiele netwerken niet worden gebruikt. Is dit wel het geval gaat de prestatie van een MANET omlaag.

3.1 Communicatiestructuur van bestaande mobiele netwerken

In deze paragraaf wordt voor iedere generatie mobiele netwerken de communicatiestructuur besproken. Als uitgangspunt wordt het cellulaire netwerk genomen, maar eerst wordt hieronder een korte opsomming gegeven van de gebruikte vaste communicatiestructuur per generatie mobiele netwerken.

- Bij draadloze telefoonsystemen maken mobiele stations gebruik van zware antennes op hoge gebouwen die voor de verstoring van het analoge signaal zorgen.
- 1G maken mobiele stations gebruik van een analoog cellulair netwerk, waarbij zware antennes vervangen zijn door veel lichtere basisstations, de zogenaamde Base Transceiver Station (BTS). Deze zorgt dat het analoge signaal van het ene mobiele station bij het andere mobiele station terecht komt. Iedere cel heeft de beschikking over een BTS die allemaal verbonden zijn met een Mobile Telephone Switching Office (MTSO). Deze zorgt voor de omschakeling van het analoge signaal van de ene cel naar de andere cel.
- 2G, 2.5G en 3G maken gebruik van een digitaal cellulair netwerk. Ook deze bestaat uit een Base Transceiver Station (BTS), Mobile Switching Center (MSC), Base Station Controller (BSC) en het mobiele station. Vele databases, waaronder een Home Location Register (HLR), Visitor Location Register (VLR), Authentication Center (AC) en Equipment Identity Register (EIR), zorgen voor de administratieve handeling van het digitale cellulaire netwerk, zoals bijvoorbeeld de lokatie van een mobiel station (meestal met behulp van een SIM (Subscriber Identity Module)), het aantal mobiele stations per cel, de veiligheidsstatus van het mobiele station etc.
- Voor 4G wordt specifiek verwezen naar de paragraaf over *communicatiestructuur van een MANET*.

Nu wordt verder gegaan met de werking van het cellulaire netwerk. Een cellulair netwerk bestaat, zoals de naam al zegt, uit vele cellen. Per cel staat een basisstation (BTS) opgesteld die de beschikking heeft over een bepaalde bandbreedte.



Figuur 10 Cellulair netwerk

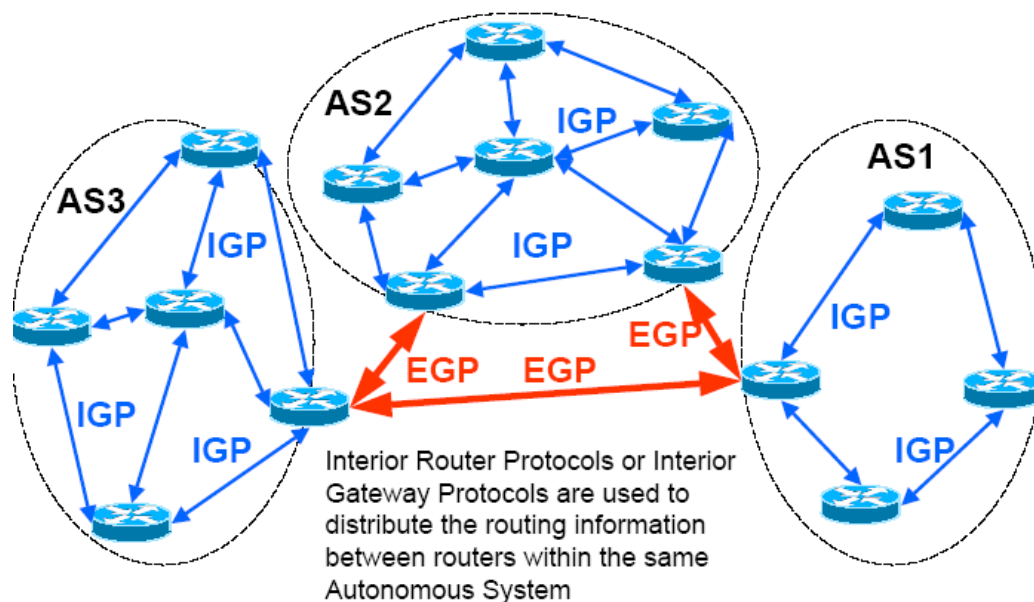
In een cellulair netwerk zijn drie soorten signalen af te leiden. Als een signaal van een mobiel station naar een basisstation wordt gestuurd heet dit *uplink*. Het tegenovergestelde wordt *downlink* genoemd. Zo nu en dan zendt een basisstation een signaal naar alle mobiele stations in de cel, zodat het basisstation precies weet welke mobiele stations zich in de cel bevinden. Dit wordt *control-link* genoemd. Als een mobiel station een signaal verstuurt naar een basisstation, wordt de positie van het mobiele station vastgelegd in het *switching centre*. Als het mobiel station zich naar een andere cel verplaatst, schakelt het *switching centre* het signaal

over naar het basisstation in de nieuwe cel. Dit gehele proces wordt *hand over* genoemd. Gedurende deze procedure is geen dataverkeer mogelijk tussen mobiele stations.

Door de toename in het gebruik van mobiele netwerken wordt een hogere performance van een mobiel netwerk verwacht. Een verschijnsel dat deze performance kan doen afnemen is *interferentie*. Dit betekent dat een frequentie in de buurt komt van twee basisstations, zodat de kwaliteit van het signaal naar een mobiel station af kan nemen. Het is mogelijk om frequenties van de ene cel te verplaatsen naar de andere cel (*re-use of frequencies*). Hierdoor kunnen frequenties op een efficiëntere manier worden gebruikt.

3.2 Routeringsprotocollen in bestaande mobiele netwerken

Hoe het dataverkeer in een mobiel netwerk van het ene mobiele station naar het andere mobiele station wordt getransporteerd ligt vast in zogenaamde routeringsprotocollen. Een routeringsprotocol is een wetboek waarin precies staat hoe het dataverkeer van het ene mobiele station naar het andere mobiele station wordt getransporteerd. In deze paragraaf wordt een kort overzicht gegeven van de gebruikte routeringsprotocollen in de bestaande mobiele netwerken. Bij de routeringsprotocollen in de bestaande mobiele netwerken moet onderscheid worden gemaakt tussen de Interior Gateway Protocols (IGP) en Exterior Gateway Protocols (EGP). Al deze routeringsprotocollen functioneren in een autonoom systeem. Een autonoom systeem is een verzameling netwerken die allemaal onder dezelfde administratieve controle vallen. Deze administratieve controle zorgt ervoor dat alle mobiele stations in een netwerk onder dezelfde omstandigheden functioneren. Zo bestaat het internet uit vele autonome systemen, omdat het internet te groot is om onder één administratieve controle te laten vallen (zie *figuur 11*).



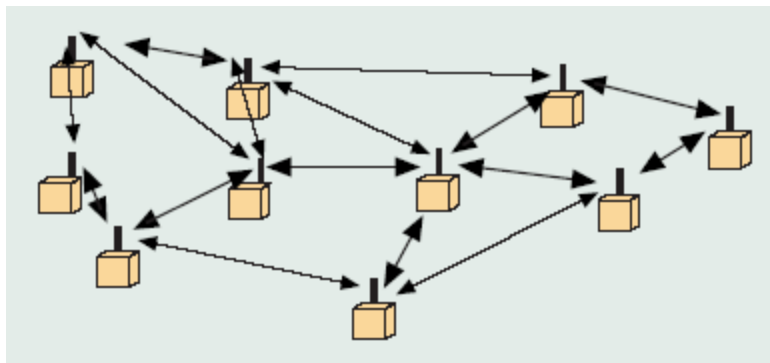
Figuur 11 IGP en EGP routeringsprotocollen

- IGP routeringsprotocollen functioneren binnen een en hetzelfde autonome systeem. Hieronder vallen bijvoorbeeld *RIP*, *IGRP*.
- De *EGP* routeringsprotocollen functioneren tussen autonome systemen onderling, waaronder *BGP* een bekend voorbeeld van is.

- Daarnaast bestaan routeringsprotocollen die beide routeringsprotocollen combineren, de zogenaamde hybride routeringsprotocollen, waarvan *OSPF* een bekend voorbeeld van is.

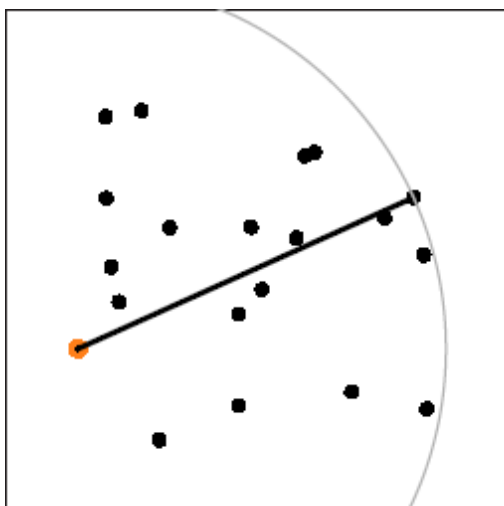
3.3 Communicatiestructuur van een MANET

In tegenstelling tot de bestaande mobiele netwerken communiceert een mobiel station in een MANET niet via vaste basisstations. Doordat een mobiel station niet meer afhankelijk is van de positie van een vast basisstation wordt communiceren makkelijker in gebieden waar geen vaste communicatiestructuur aanwezig is. Mobiele stations moeten zowel signalen kunnen verzenden (*uplink*) als kunnen ontvangen (*downlink*).

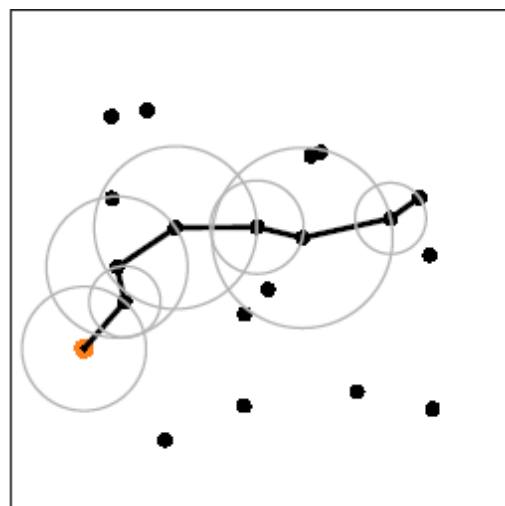


Figuur 12 MANET

Het is niet altijd gemakkelijk om verbinding te krijgen tussen mobiele stations, vanwege de onderlinge beweeglijkheid. Wil een mobiel station communiceren met een ander mobiel station, dan kan dit op twee manieren gebeuren. Ten eerste via directe communicatie (zie *figuur 13*) en ten tweede via indirecte communicatie (zie *figuur 14*), waarbij gebruik wordt gemaakt van tussenliggende mobiele stations.



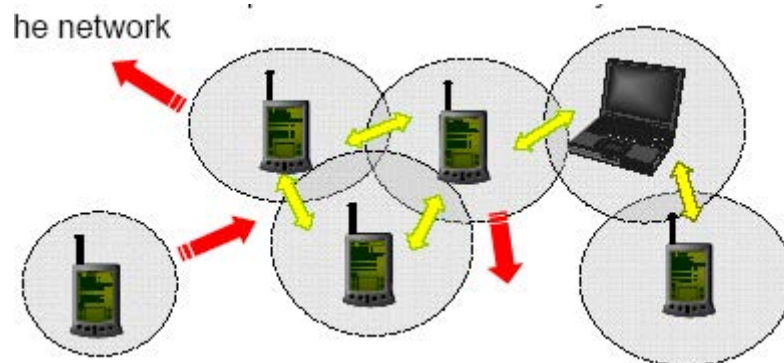
Figuur 13 directe communicatie



Figuur 14 indirecte communicatie

Mobiele stations kunnen bijvoorbeeld een Personal Digital Assistant (PDA), laptop of een mobiele telefoon zijn. Wil een mobiel station een signaal (analoog cq digitaal) willen ontvangen van een ander mobiel station dan moet er overlap zijn tussen twee bedekkingsgebieden. Het bedekkingsgebied van een mobiel station is de oppervlakte waarin

ontvangst van een signaal mogelijk is. Theoretisch gezien wordt dit gebied als een cirkel verondersteld. In de praktijk is dit vaak niet het geval, bijvoorbeeld door obstakels in het bedekkingsgebied.



Figuur 15 MANET met 6 mobiele stations

In *figuur 15* geeft de gele pijl aan dat signaal ontvangst mogelijk is tussen twee mobiele stations, terwijl de rode pijl aangeeft dat dit niet mogelijk is.

De grootte van een MANET hangt mede af van de functie ervan. Een MANET bij militaire operaties (honderden of duizenden mobiele stations) zal groter zijn, dan één die gebruikt wordt bij intelligente transportsystemen (tientallen mobiele stations).

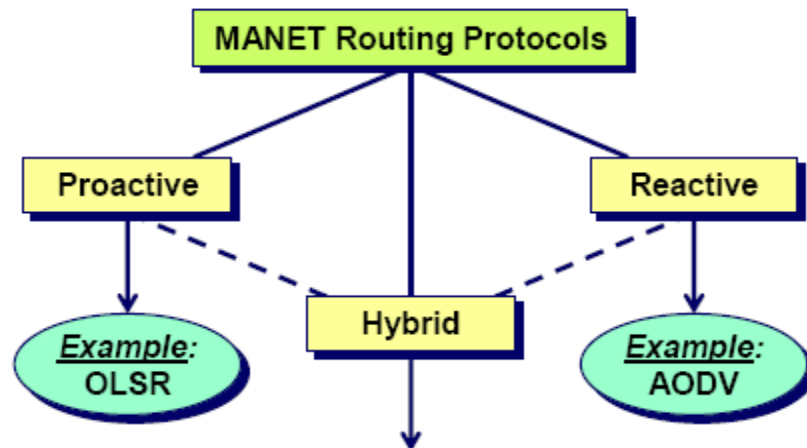
Het dataverkeer in een MANET zal optimaal gebruik kunnen maken van de capaciteit van een mobiel netwerk, als alle mobiele stations actief zijn. Doordat een MANET functioneert op een lage energievoorziening moeten mobiele stations dicht in de buurt liggen. Een interessante vraag is hoeveel mobiele stations minimaal nodig zijn om een zekere BedekkingsKans te realiseren. Deze vraag hangt vooral af van de sterkte (reikwijdte) van het signaal. Hoe meer mobiele stations bij elkaar in de buurt liggen, des te groter is de BedekkingsKans. De BedekkingsKans is de kans dat contact mogelijk is tussen twee willekeurige mobiele stations. Als mobiele stations niet over voldoende energie beschikken, leidt dit tot slecht functioneren (slapende mobiele stations) of zelfs tot complete uitval. Hierdoor neemt de performance van een MANET af. Hieruit kan worden geconcludeerd, dat de snelle inzetbaarheid van een MANET vaak ten koste gaat van de kwaliteit en de betrouwbaarheid van de verbinding (connectiviteit). In de volgende paragraaf wordt ingegaan op de routeringsprotocollen in een MANET.

3.4 Routeringsprotocollen in een MANET

De routeringsprotocollen die gebruikt worden in de bestaande mobiele netwerken hebben een hele slechte performance in MANETs. Dit komt door de

- beweeglijkheid van de mobiele stations,
- interferentie van signalen,
- maximale datacapaciteit van elk mobiel station.

De routeringsprotocollen in een MANET worden in drie categorieën onderverdeeld (*zie figuur 16*),



Figuur 16 Classificatie routeringsprotocollen in een MANET

- De eerste categorie zijn de *reactive* routeringsprotocollen. In deze categorie wordt geprobeerd om een *k-stapspad* te vinden tussen mobiele stations, alleen als dataverkeer nodig is. Een *k-stapspad* is een route tussen twee willekeurige mobiele stations via *k* tussenliggende mobiele stations. Een nadeel hiervan is de vertraging in het vinden van een route, omdat alleen naar routes wordt gezocht als er daadwerkelijk dataverkeer is. Bekende voorbeelden zijn *CBRP*, *ADVR*, *DSRP*, *TORA*, *ABR* en *SSR*.
- De tweede categorie zijn op tabel (*pro-active*) gebaseerde routeringsprotocollen. Elk algoritme in deze categorie is voortdurend op zoek naar routes in het netwerk, ook al zijn er momenten dat geen dataverkeer is. Routes worden voortdurend in een tabel bijgehouden, zodat iedere keer als er dataverkeer is, de volgende mobiele stations in de route bekend zijn. Een nadeel van deze categorie is het continue gebruik van de totale capaciteit van het mobiele netwerk voor het up-to-date houden van de tabel. In deze categorie vallen onder anderen *DSDV*, *WRP*, *GSR*, *FSR*, *HSR*, *ZHLS* en *CGSR*.
- De derde categorie zijn de zogenaamde hybride (tweeledige) routeringsprotocollen. Hierbij wordt zowel gebruik gemaakt van *reactive* als *pro-active* routeringsprotocollen. Als mobiele stations dicht bij het mobiele station liggen dat het signaal verstuurt, dan wordt gebruik gemaakt van *pro-active* routeringsprotocollen. Is het tegenovergestelde het geval, dan wordt gebruik gemaakt van *reactive* routeringsprotocollen.

Uitbreidingen op routeringsprotocollen uit alle categorieën zijn gedaan om de performance van een MANET te verbeteren. Als een mobiel station uitvalt, wegens een lage energievoorziening, moeten dergelijke routeringsprotocollen in staat zijn een alternatieve route te vinden. Het gevolg hiervan is, dat de transporttijd van een signaal tussen twee willekeurige mobiele stations toeneemt.

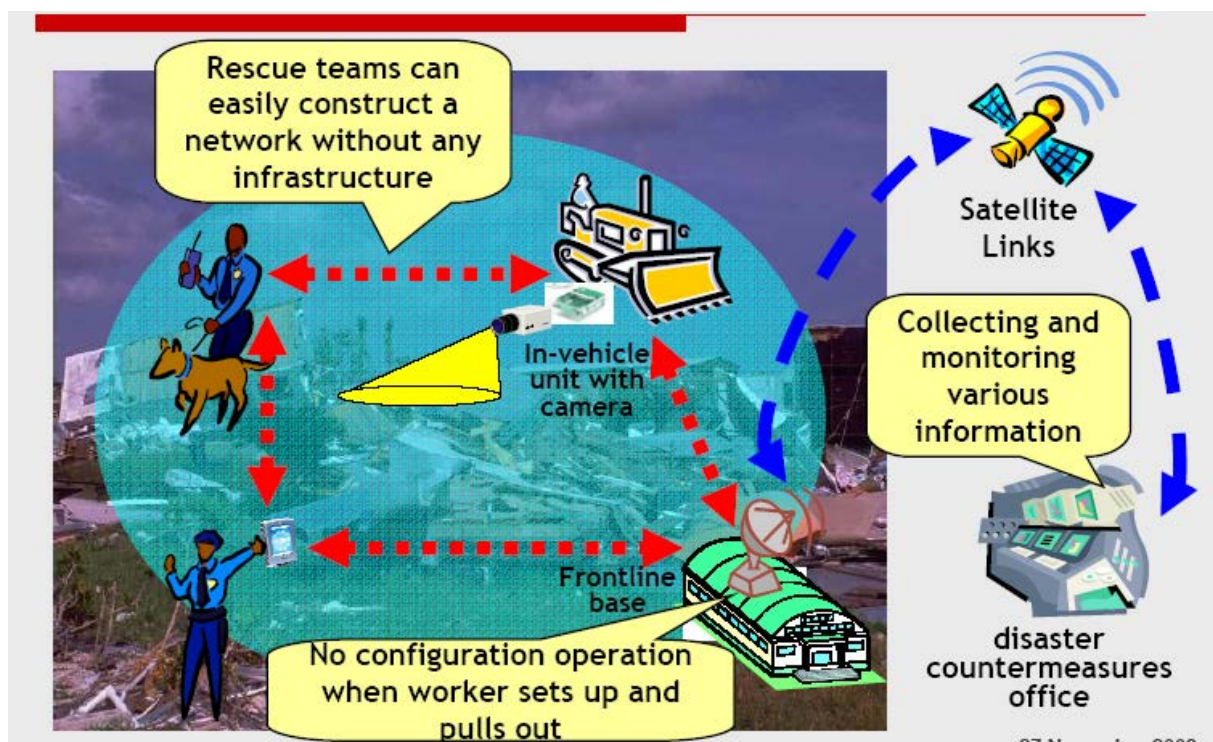
In het volgende hoofdstuk worden toepassingsgebieden van MANETs behandeld.

Hoofdstuk 4: Toepassingsgebieden MANETs

Zoals in de inleiding is aangegeven kunnen MANETs een grote rol spelen in situaties waar snelheid geboden is, de vaste communicatiestructuur ontbreekt of het te kostbaar is om een nieuwe communicatiestructuur aan te leggen. In dit hoofdstuk zullen verschillende toepassingen van MANETs belicht worden. Zowel hedendaagse situaties als toekomstgerichte situaties zullen worden besproken.

4.1 Militaire operaties

Een MANET kan van toepassing zijn bij militaire operaties. Bij militaire operaties moeten soldaten, legervoertuigen en eventueel helikopters onderling continu contact met elkaar hebben om tactische informatie te krijgen over de stand van zaken over de vijand. Hierdoor wordt het enerzijds makkelijker om te weten waar specifieke doelwitten zich bevinden en anderzijds wat de beste manier is om zulke doelwitten aan te vallen. Een MANET wordt aangesloten op het satellietnetwerk, zodat de soldaten en legervoertuigen onderling weten waar ze zich bevinden.

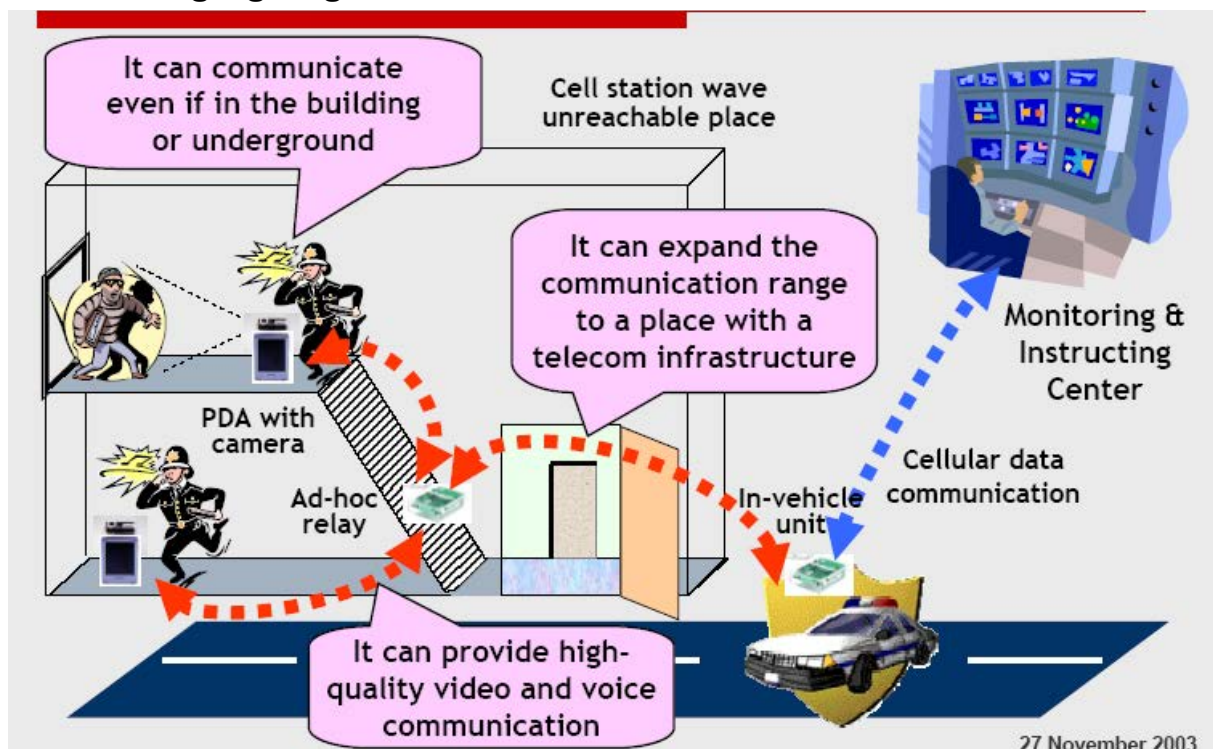


Figuur 17 Toepassingsgebied reddingsoperaties

4.2 Reddingsoperaties

Bij reddingsoperaties is snelle communicatie tussen de hulpverleners een van de belangrijkste factoren. Aangezien bij reddingsoperaties hulpverleners mobiel moeten zijn om zo snel mogelijk de slachtoffers in veiligheid te brengen moeten ze onderling betrouwbare informatie uitwisselen om zo'n operatie tot een goed einde te brengen. In zulke gevallen is het handig om de beschikking te hebben over een MANET. Zeker als door rampen de communicatiestructuur volledig verwoest is kunnen hulpverleners met behulp van een MANET snel in actie komen en de redding cq evacuatie op een snelle en efficiënte manier coördineren. Het opzetten van een vaste communicatiestructuur in dergelijke rampgebieden is te kostbaar, te tijdrovend en te kwetsbaar, aangezien zich nieuwe calamiteiten kunnen voordoen.

4.3 Beveiliging in gebouwen



Figuur 18 Toepassingsgebied veiligheidssystemen

Voor beveiligingsvraagstukken kunnen MANETs van grote waarde zijn. In musea en andere gebouwen waar dure spullen zijn opgeslagen kunnen MANETs worden geïnstalleerd. Door de lage energievoorziening en zonder vaste communicatiestructuur kunnen MANETs ‘snachts de boel in te gaten houden. Mocht het mis gaan, (zie figuur 18), dan kan meteen contact opgenomen worden met de alarmcentrale, die op zijn beurt meteen de politie inschakelt. Zonder kostbare tijd te verliezen gaat de politie naar de plaats van het delict en kan de inbreker op heterdaad betrappen.

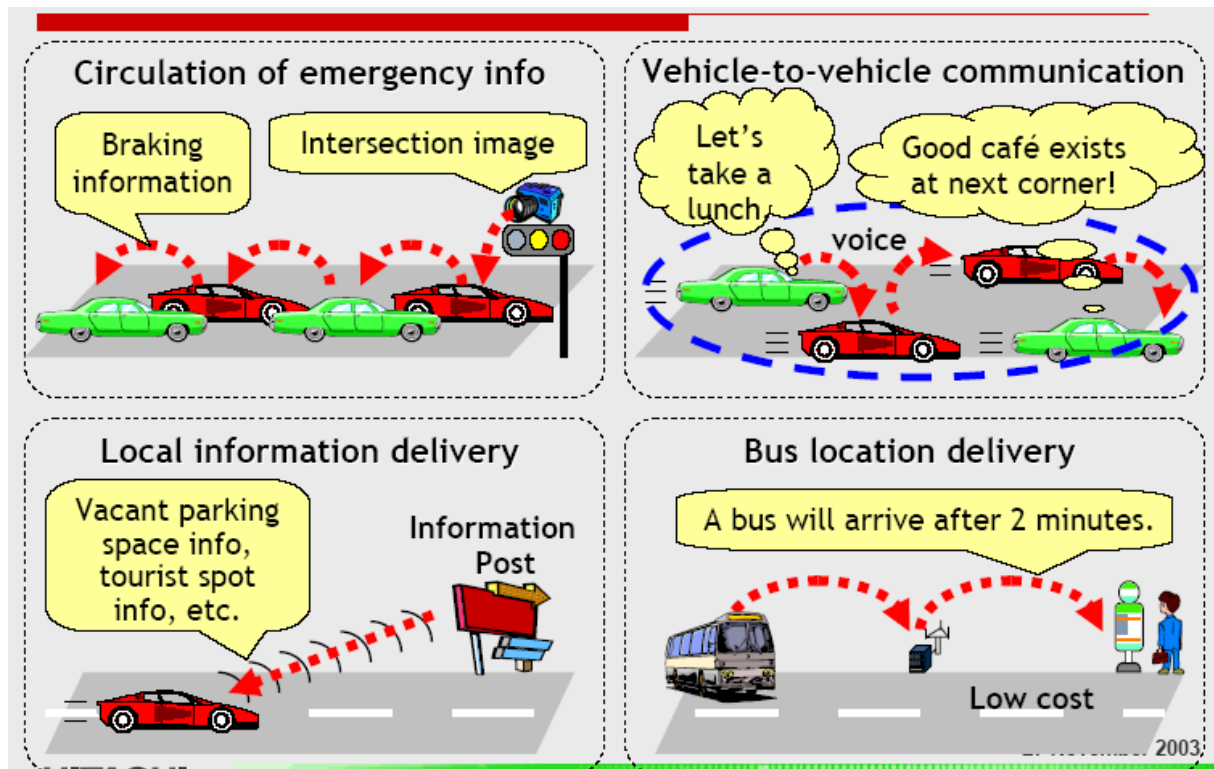
4.4 Vliegbewegingen bij landingsbanen

Door een toename in het aantal vliegbewegingen, neemt de werkdruk op vliegverkeersleiders toe. Door het aantal vliegbewegingen zijn het aantal beschikbare frequenties waarover vliegverkeersleiders communiceren continu bezet. Door deze werkdruk komt de nauwkeurigheid om een vliegtuig veilig naar de landingsbaan te loodsen in gevaar. In eerste instantie wordt onbeheerd vliegen als optie genoemd. Vliegtuigen communiceren pas met de luchtverkeersleiding zodra ze in de buurt komen van de landingsbaan. Een MANET zou een betere optie zijn. De luchtverkeersleiding heeft per landingsbaan een MANET ter beschikking en kan hierdoor zelf bepalen hoeveel frequenties nodig zijn om het aantal vliegbewegingen per landingsbaan in goede banen te leiden. De kans op botsingen zal hierdoor afnemen. Er is een geval bekend dat twee gezagvoerders op dezelfde frequentie met de verkeersleiding zaten te communiceren, waardoor over en weer niet goed begrepen werd wat te doen, dat uiteindelijk tot een frontale botsing in de lucht heeft geleid.

4.5 Intelligente transportsystemen

Door het steeds mobieler worden van de mens kunnen intelligente transportsystemen (zie figuur 19) hier op inspelen. Als een gezin op vakantie is, kunnen ze onderweg specifieke informatie opvragen omtrent toeristische attracties. Onderweg kunnen ze beslissen of het de moeite waard is de attractie te bezoeken. Reisgezelschappen die in meerdere voertuigen

onderweg zijn, kunnen tijdens het rijden afspraken maken over wanneer en waar ze willen gaan lunchen. Door middel van een MANET kunnen in bovengenoemde scenario's snel en efficiënt korte termijn beslissingen worden genomen.

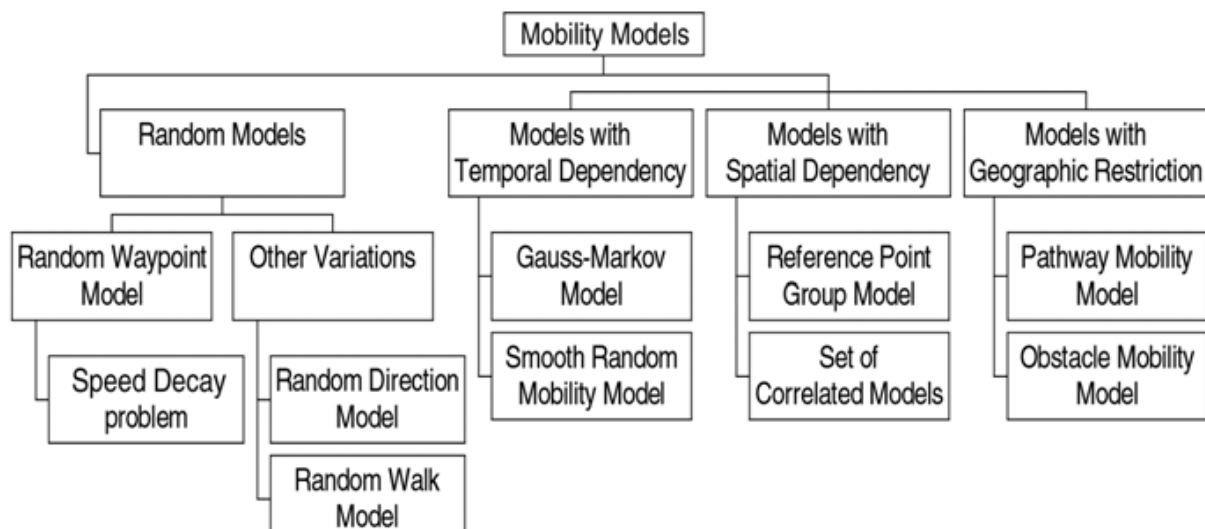


Figuur 19 Toepassingsgebied Intelligente Transportsystemen

Hoofdstuk 5: Communicatiepatronen in MANETs

Communicatiepatronen in een MANET kunnen vergeleken worden met bewegingen van bezoekers op een popfestival, een universiteitsgebouw of een tentoonstelling. Op een popfestival bewegen bezoekers naar een centrale plek om voor bepaalde tijd naar muziek te luisteren. De centrale plek wordt omgeven door vele kleine plaatsen, waar bezoekers kunnen bijkomen van de muziek. Op het VU universiteitsterrein bewegen studenten zich naar verschillende gebouwen. De aanname is dat de gebouwen dicht bij elkaar staan. Op een tentoonstelling in het Rijksmuseum staan mensen voor korte tijd naar een schilderij te kijken, alvorens verder te gaan naar het volgende schilderij. In deze drie geschetste situaties bewegen mensen willekeurig van plaats naar plaats. Deze drie situaties kenmerken de beweeglijkheid van mobiele stations in een MANET.

Een model is een vereenvoudigde weergave van de complexe werkelijkheid. Het is onmogelijk om alle factoren die een rol spelen bij de beweeglijkheid van knooppunten in een MANET mee te nemen in de modelbeschrijving. Hieronder is een hiërarchie te zien van veel gebruikte beweeglijkheidsmodellen in MANETs.



Figuur 20 Hiërarchie van beweeglijkheidsmodellen

Van deze modellen wordt een *random waypoint model* vooral bij simulaties gebruikt. In andere modellen verplaatsen mobiele stations zich afhankelijk van eerder genomen bewegingen (*mobility model with temporal dependency*). Toepassingen zijn te vinden in de snelheid van voertuigen en voetgangers. In andere modellen bewegen mobiele stations op een gecorreleerde manier (*mobility model with spatial dependency*). Deze modellen worden gebruikt bij militaire acties en reddingsoperaties. In weer andere modellen zijn de bewegingen van mobiele stations afhankelijk van straten, snelwegen en obstakels (*mobility model with geographic restriction*). Deze modellen kunnen worden gebruikt in stedelijke gebieden.

In het volgende hoofdstuk wordt in de tweedimensionale ruimte een simulatiemodel gebruikt. Kijkend naar de hiërarchie van beweeglijkheidsmodellen zal het een random model zijn.

Hoofdstuk 6: Model bedekkingsprobleem in MANETs

In dit hoofdstuk wordt voor zowel de eendimensionale als tweedimensionale ruimte een model gebruikt om het bedekkingsprobleem in MANETs nader onder het licht te houden. In dit hoofdstuk wordt gesproken over knooppunten in plaats van mobiele stations. Voor de eendimensionale ruimte is een model gebruikt waarbij de BedekkingsKans is af te leiden geschreven als functie van de lengte van de straal r . Voor de tweedimensionale ruimte worden met behulp van simulaties drie onderzoeksvragen geanalyseerd en zijn als volgt geformuleerd

- 1) Wat is de invloed van de lengte van de straal r op de BedekkingsKans?
- 2) Wat is de invloed van het aantal knooppunten n op de BedekkingsKans?
- 3) Hoe loopt het verband tussen het aantal knooppunten n en de lengte van de straal r bij gegeven waarschijnlijkheid van de BedekkingsKans?

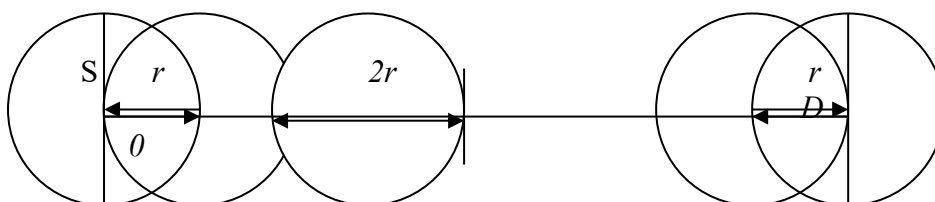
Met behulp van scripts, geschreven in S-PLUS en R, zijn deze onderzoeksvragen onderzocht. Deze scripts staan in de bijlage ter ondersteuning van de opsomming van de grafieken in dit hoofdstuk.

6.1 Modelbeschrijving eendimensionale ruimte

In de eendimensionale ruimte worden n knooppunten op het interval $[0,1]$ gepositioneerd. Hierbij is de stochast $X=x$ gedefinieerd als de positie van een toegevoegd knooppunt x waarbij op de posities $X=0$ en $X=1$ twee vaste knooppunten zijn gepositioneerd. Knooppunten kunnen een signaal ontvangen als twee bedekkingsgebieden overlap vertonen. Hieronder worden de definities gegeven van het bedekkingsgebied, de lengte van de straal r en de BedekkingsKans.

- Het bedekkingsgebied is het gebied waar een signaal ontvangen kan worden, deze wordt theoretisch als een cirkel om het knooppunt heen verondersteld,
- De lengte van de straal r is een maat voor de grootte van het bedekkingsgebied,
- De BedekkingsKans is de kans dat een signaal contact maakt met het bedekkingsgebied van een willekeurig knooppunt.

Schematisch ziet dit er als volgt uit:



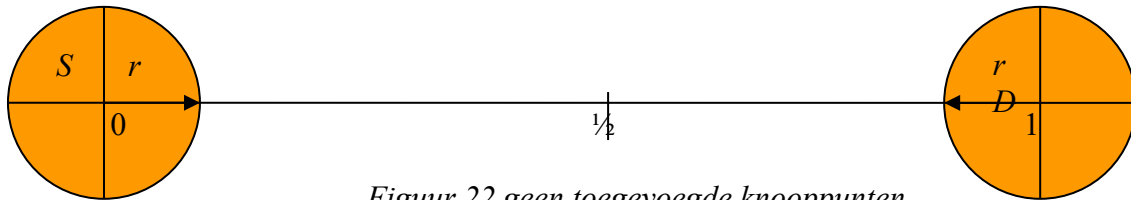
Figuur 21 n knooppunten gepositioneerd in de eendimensionale ruimte

Iedere keer als een knooppunt x wordt toegevoegd tussen knooppunt S (Source) en knooppunt D (Destination), is een cumulatieve verdelingsfunctie af te leiden voor de BedekkingsKans als functie van r . Voor $n=0,1,2$ wordt in de volgende paragraaf de cumulatieve verdelingsfunctie afgeleid. De cumulatieve verdelingsfunctie specificeert voor alle waarden van de lengte van

de straal r de kans dat alle n toegevoegde knooppunten kleiner zijn dan de lengte van de straal r . In veel modellen wordt gewerkt met knooppunten van verschillende lengten van de straal r , maar dat wordt in dit model buiten beschouwing gelaten.

6.1.1 Cumulatieve verdelingsfuncties

Voor $n=0$ ziet het schematisch als volgt uit



Figuur 22 geen toegevoegde knooppunten

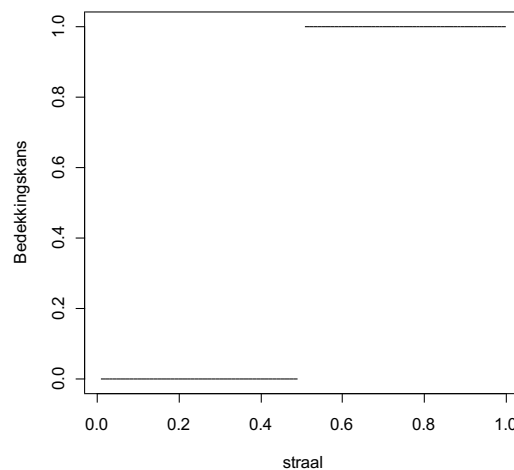
Het interval $[0,1]$ kan met $2r$ worden opgevuld

- Als $r < 1/2$ is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan 0. Op dat moment is op geen enkele manier overlap mogelijk tussen knooppunt S en knooppunt D,
- Als $r \geq 1/2$ is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan 1.

Samengevat ziet de cumulatieve verdelingsfunctie voor $n=0$ als volgt uit:

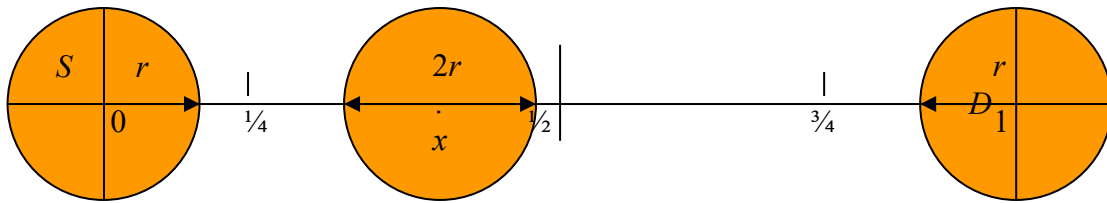
$$F(0,r) = \begin{cases} 0 & r < 1/2 \\ 1 & r \geq 1/2 \end{cases} \quad (6.1)$$

In grafiekvorm ziet het er zo uit:



Figuur 23 $F(0,r)$

Voor $n=1$ ziet het schematisch als volgt uit



Figuur 24 Één toegevoegd knooppunt

Het interval $[0,1]$ kan met $4r$ worden opgevuld. Het toegevoegde knooppunt x kan zowel aan de linkerkant als aan de rechterkant worden gepositioneerd.

- Als $r < 1/4$ is geen verbinding mogelijk tussen knooppunt S en knooppunt D. Hierdoor is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan 0.
- Voor $1/4 \leq r < 1/2$ is de cumulatieve verdelingsfunctie als volgt.

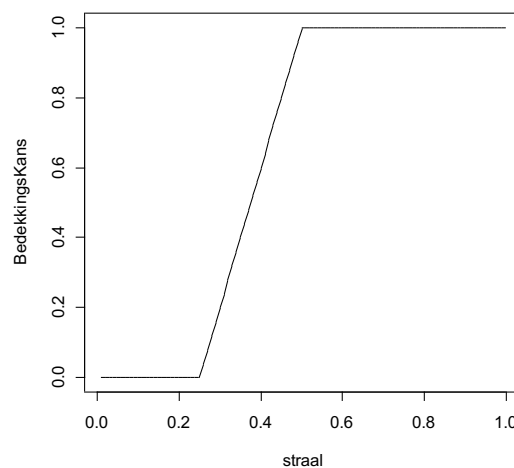
Als het knooppunt x tussen het linker knooppunt S en rechter knooppunt D wordt gepositioneerd, onder de aanname deze homogeen verdeeld is over het interval $[0,1]$ is de kans hierop gelijk aan $2r - (1 - 2r) = 4r - 1$.

- Als $r \geq 1/2$ is wel verbinding mogelijk tussen knooppunt S en knooppunt D. Hierdoor is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan 1

Samengevat komt de cumulatieve verdelingsfunctie voor $n=1$ als volgt op neer

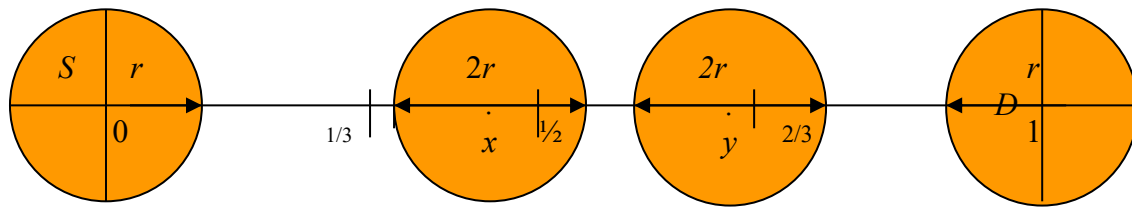
$$F(1,r) = \begin{cases} 0 & r < 1/4 \\ 4r - 1 & 1/4 \leq r < 1/2 \\ 1 & r \geq 1/2 \end{cases} \quad (6.2)$$

In grafiekvorm ziet het er zo uit:



Figuur 25 $F(1,r)$

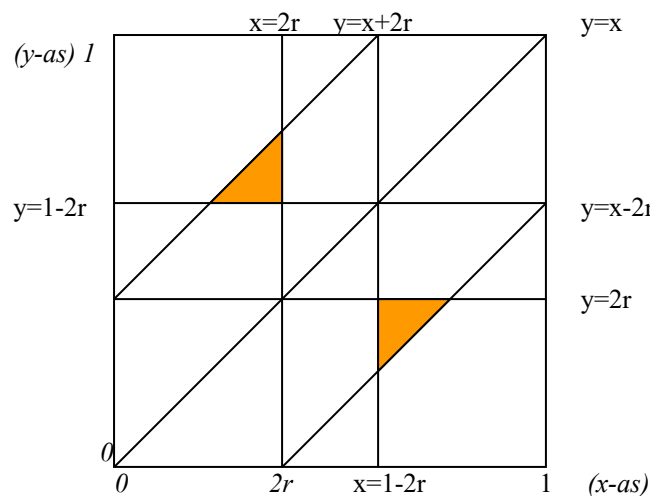
Voor $n=2$ ziet het schematisch als volgt uit



Figuur 26 Twee toegevoegde knooppunten

Het interval $[0,1]$ kan met $6r$ worden opgevuld. De twee knooppunten x en y zijn homogeen verdeeld op het interval $[0,1]$. Als $x < y$ gelden de voorwaarden $0 \leq x < 2r$, $y - x \leq 2r$ en $y \geq 1 - 2r$. Als $x > y$ gelden de voorwaarden $0 < y \leq 2r$, $x - y \leq 2r$ en $x \geq 1 - 2r$.

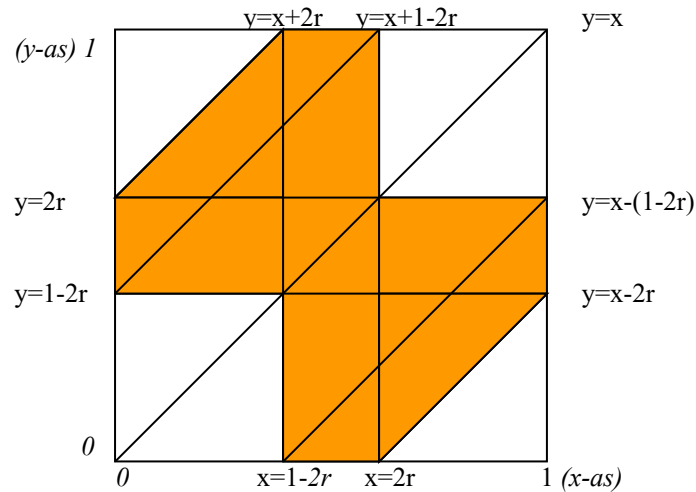
- als $r < 1/6$ is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan 0,
- als $1/6 \leq r < 1/4$ geldt met bovengenoemde voorwaarden het volgende oranje gebied in het xy -vlak,



Figuur 27 xy -vlak $1/6 \leq r < 1/4$

De twee oranje gebieden zijn even groot. Met behulp van de aanname dat het interval $[0,1]$ homogeen verdeeld is, is de oppervlakte van het oranje gebied als volgt. Het snijpunt tussen de lijnen $y = x + 2r$ en $y = 1 - 2r$ is gelijk aan $x + 2r = 1 - 2r$. De lengte van het oranje gebied loopt van $1 - 4r$ tot $2r$. Oftewel $2r - (1 - 4r) = 6r - 1$. Aangezien de lengte van de x -as en y -as gelijk zijn, is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan $(6r - 1)^2$.

- Als $1/4 \leq r < 1/2$ leidt dit met de bovengenoemde voorwaarden op de volgende pagina tot de volgende schematische voorstelling,



Figuur 28 xy-vlak $1/4 \leq r < 1/2$

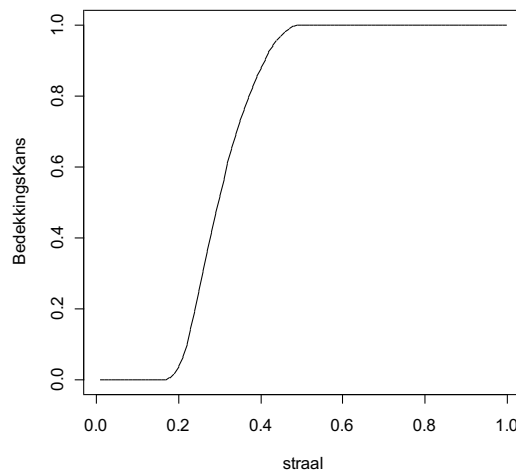
De cumulatieve verdelingsfunctie is gelijk aan het oranje gebied. Met de aanname dat het homogeen verdeeld is op het interval $[0,1]$ is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan $\left(1 - \left[(1-2r)^2 + (1-2r)^2 + (1-2r)^2\right]\right) = 1 - (3 - 12r + 12r^2) = 12r - 12r^2 - 2$.

- Als $r \geq 1/2$ is de cumulatieve verdelingsfunctie gelijk aan 1

Samengevat komt de cumulatieve verdelingsfunctie voor $n=2$ als volgt op neer

$$F(2,r) = \begin{cases} 0 & r < 1/6 \\ (6r-1)^2 & 1/6 \leq r < 1/4 \\ 12r - 12r^2 - 2 & 1/4 \leq r < 1/2 \\ 1 & r \geq 1/2 \end{cases} \quad (6.3)$$

In grafiekvorm ziet het er zo uit:

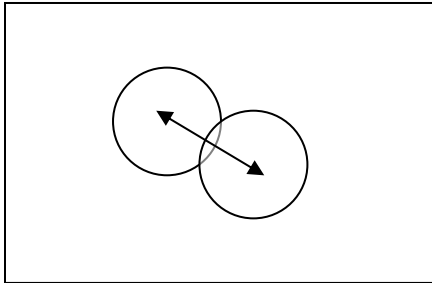


Figuur 29 $F(2,r)$

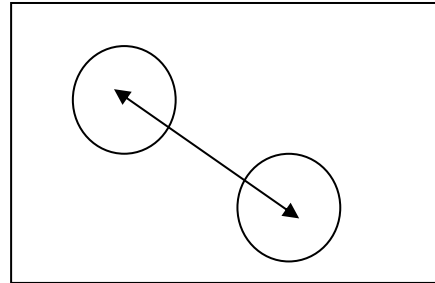
Voor $n > 2$ worden de bijbehorende cumulatieve verdelingsfuncties te ingewikkeld.

6.2 Modelbeschrijving tweedimensionale ruimte

In de tweedimensionale ruimte worden verschillende aantallen knooppunten n willekeurig gepositioneerd in de euclidische ruimte van $(x, y) \in [0,1] \times [0,1]$, waarbij (x, y) geordende paren zijn. Hieronder worden twee figuren geschetst van 2 knooppunten in een MANET, waarbij afhankelijk van de positie van de knooppunten, in het ene geval sprake is van verbinding en in het andere geval geen sprake is van verbinding.



Figuur 30 verbinding ($n=2$)



Figuur 31 Geen verbinding ($n=2$)

De BedekkingsKans tussen twee willekeurige knooppunten (x_i, y_i) en (x_j, y_j) is als volgt gedefinieerd,

$$F(n, r) = \begin{cases} 0 & \text{als } d > 2r \\ 1 & \text{als } d \leq 2r \\ d = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2} \\ i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, n \\ i \neq j \\ n \geq 2 \end{cases} \quad (6.4)$$

Meestal is niet een directe verbinding mogelijk, maar moet met behulp van een k -stapspad een verbinding worden gevonden. Een k -stapspad is een route via k tussenliggende knooppunten van knooppunt S naar knooppunt D. Een pad is een verzameling knooppunten dat een verschillend begin- en eindpunt heeft. Zo is bijvoorbeeld een 0-stapspad tussen twee knooppunten een voorbeeld van een directe verbinding. Terwijl een 3-stapspad een indirecte verbinding voorstelt tussen twee knooppunten via drie tussenliggende knooppunten. Als sprake is van een k -stapspad tussen twee willekeurige knooppunten (x_i, y_i) en (x_j, y_j) is de BedekkingsKans als volgt gedefinieerd,

$$F(n, r) = \begin{cases} 1 & \text{als een } k\text{-stapspad bestaat tussen } (x_i, y_i) \text{ en } (x_j, y_j) \\ 0 & \text{anders} \\ i = 1, 2, \dots, n \\ j = 1, 2, \dots, n \\ k = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 2 \\ i \neq j \\ n \geq 2 \end{cases} \quad (6.5)$$

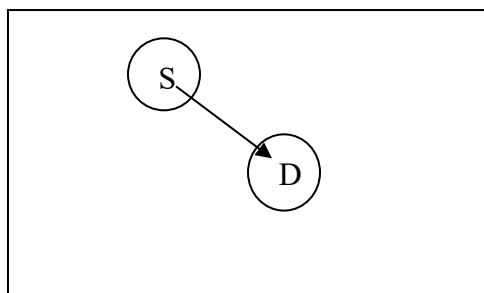
Met behulp van bovengenoemde grootheden zal via simulaties de drie onderzoeksvragen genoemd in de inleiding, nader onderzocht worden. Deze worden op de volgende manier geanalyseerd

- 1) Bij verschillende aantallen knooppunten n wordt gekeken naar de BedekkingsKans tussen twee knooppunten naarmate de lengte van de straal r toeneemt,
- 2) Bij verschillende lengten van de straal r wordt gekeken naar de BedekkingsKans tussen twee knooppunten, naarmate het aantal knooppunten n toeneemt,
- 3) Bij gegeven waarschijnlijkheid van de BedekkingsKans wordt gekeken naar het verband tussen het aantal knooppunten n en de lengte van de straal r .

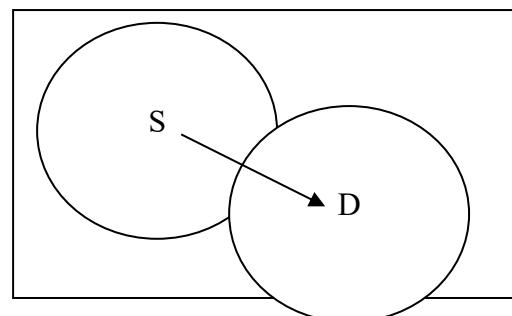
Van iedere onderzoeksvraag wordt in de volgende paragraaf met behulp van grafieken en een schematische voorstelling de resultaten verduidelijkt.

6.2.1 Simulatieresultaten onderzoeksvragen

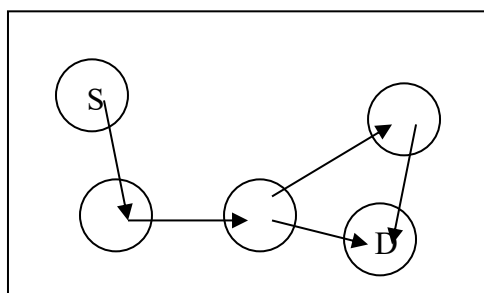
Onderzoeksvraag 1 gaat in op het bestaan van een verbinding tussen 2 knooppunten, gebruikmakend van de definitie van een k -stapspad. Hierbij is het aantal knooppunten n de vaste parameter en de lengte van de straal r de variabele parameter. Met behulp van simulaties is voor het aantal knooppunten $n=2, 5$ en 10 gekeken naar het verband tussen de lengte van de straal r en de BedekkingsKans. Voor $n=2$ en 5 knooppunten wordt dit schematisch uitgelegd.



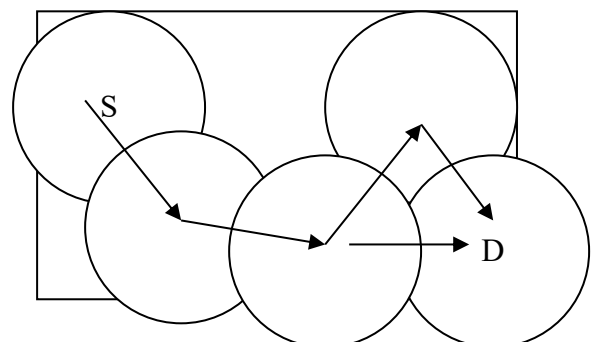
2 knooppunten met r klein



2 knooppunten met r groot



5 knooppunten met r klein

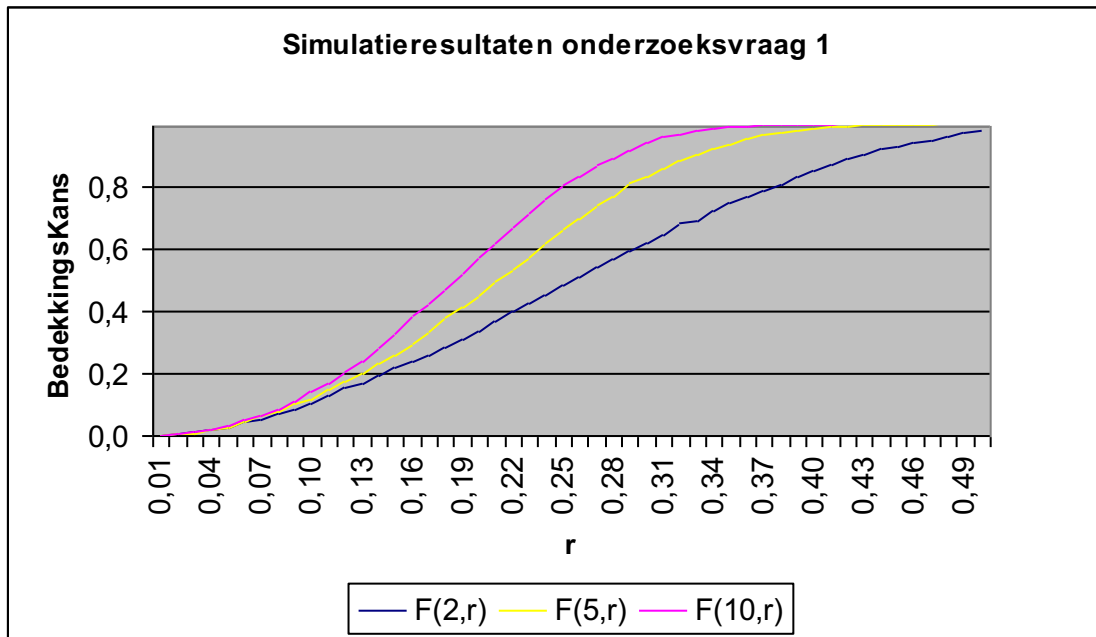


5 knooppunten met r groot

Figuur 32 voorstelling van $n=2,5$ bij r klein en groot

Voor $n=2$ is bij r groot een directe verbinding mogelijk tussen knooppunt S en D. Bij $n=5$ is bij r groot een verbinding via een 2-stapspad en 3-stapspad mogelijk tussen knooppunt S en

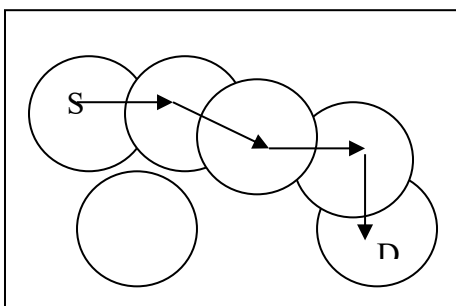
D. Voor het aantal knooppunten $n=2,5$ en 10 heeft dat met behulp van simulaties in *figuur 33* geresulteerd,



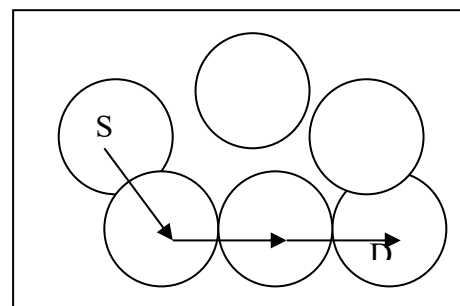
Figuur 33 Verband tussen de lengte van de straal r en de BedekkingsKans

Uit bovengenoemde grafiek valt op naarmate de lengte van de straal r toeneemt, de knooppunten S en D via een k -stapspad met elkaar in verbinding staan. De BedekkingsKans heeft bij straal $r \geq 1/2$ de waarde 1 bereikt. Dit impliceert dat ongeacht de positie van de twee knooppunten S en D altijd sprake is van verbinding. In bijlage 2 staan voor de aantallen knooppunten $n=2,5, 10$ en 20 elke grafiek even apart vermeld. Verder is op te maken, naarmate meer knooppunten in de euclidische ruimte worden gepositioneerd des te steiler loopt de curve van de BedekkingsKans voor de knooppunten S en D .

Voor de tweede onderzoeksvraag is met behulp van verschillende vaste lengten van de straal r het verband onderzocht tussen het aantal knooppunten n en de BedekkingsKans. Ook hier wordt gebruik gemaakt van de definitie van een k -stapspad.



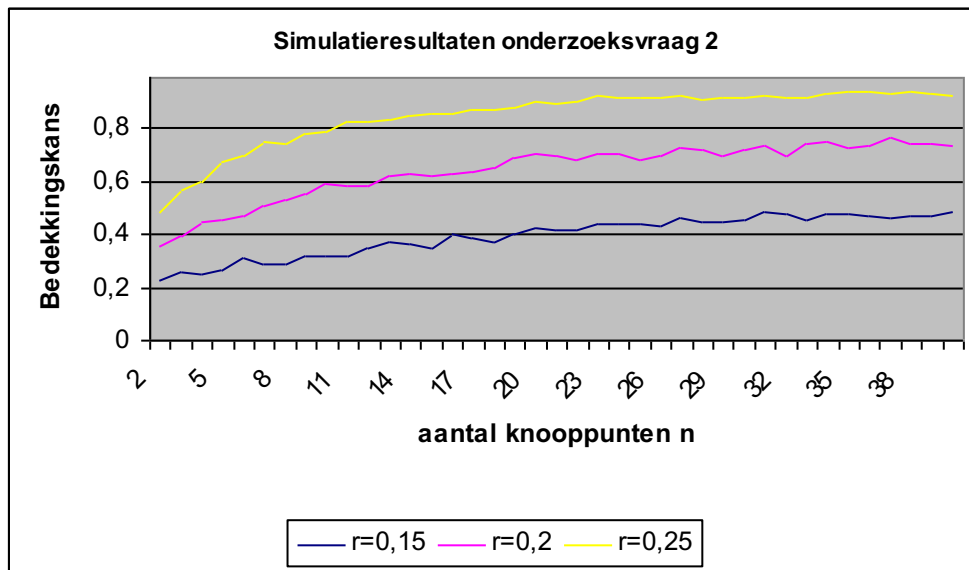
Figuur 34 drie-stapspad



Figuur 35 twee-stapspad

Hierboven zijn op twee manieren een k -stapspad tussen knooppunt S en knooppunt D geconstrueerd. Met behulp van een algoritme geschreven in S-PLUS wordt gekeken of een k -stapspad bestaat. Is dit het geval wordt met behulp van simulaties de BedekkingsKans berekend. Gedurende de simulatieruns is de lengte van de straal r de vaste parameter en is het

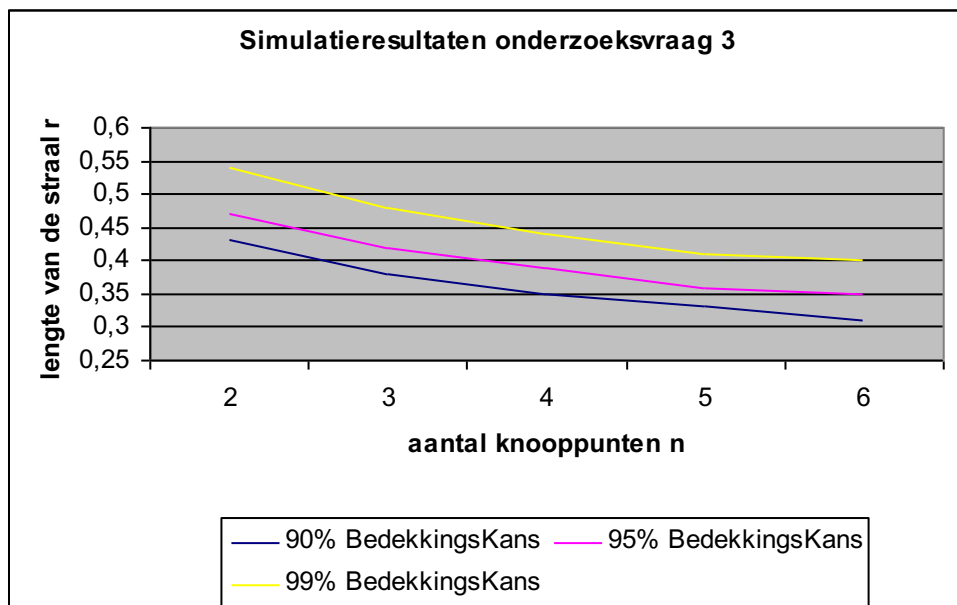
aantal knooppunten n de variabele parameter. Voor de lengte van de straal $r=0,15$, $0,2$ en $0,25$ zijn in *figuur 36* de curves te zien.



Figuur 36 Verband aantal knooppunten n en de BedekkingsKans

Bij straal $r=0,2$ begint de BedekkingsKans van $n=2$ knooppunten in een MANET bij $0,35$ en loopt door tot $0,55$ bij $n=10$. Bij straal $r=0,3$ begint deze bij $0,6$ ($n=2$) en loopt door tot $0,95$ ($n=10$).

De laatste onderzoeksvraag gaat over het verband tussen het aantal knooppunten n en de lengte van de straal r bij 90%, 95% en 99% waarschijnlijkheid van de BedekkingsKans. Dit houdt in, wil een BedekkingsKans van 95% gerealiseerd worden, bij $n=2$ de lengte van de straal r minimaal $0,47$ moet zijn.



Figuur 37 90%, 95% en 99% waarschijnlijkheid BedekkingsKans

Wil een BedekkingsKans van 99% worden gerealiseerd, de lengte van de straal r bij $n=3$ minimaal $0,48$ moet zijn. Hoe hoger de gegeven waarschijnlijkheid van de BedekkingsKans des te hoger komt de curve te liggen tussen het aantal knooppunten n en de lengte van de straal r .

Conclusies

In hoofdstuk 1 is gekeken naar de evolutie van mobiele netwerken, waarbij onderscheid werd gemaakt tussen de bestaande mobiele netwerken en MANETs. Hoofdstuk 2 ging dieper in op het verschil tussen analoge en digitale communicatie, waarbij in hoofdstuk 3 de architectuur van de bestaande mobiele netwerken en MANETs werd behandeld. In hoofdstuk 4 werden vele toepassingen behandeld van MANETs. Hoofdstuk 5 ging in op veel gebruikte beweeglijkheidsmodellen om de communicatiepatronen in MANETs te analyseren. In hoofdstuk 6 is voor zowel de eendimensionale- als tweedimensionale ruimte een model gebruikt om het bedekkingsprobleem nader onder het licht te houden. Hieronder zal voor de eendimensionale- en tweedimensionale ruimte een opsomming worden gegeven van de resultaten aansluitend gevolgd met toepassingen waar MANETs van grote waarde kunnen zijn. Het hoofdstuk eindigt met een opsomming van punten waar verder onderzoek naar gedaan kan worden om het functioneren van MANETs te verbeteren.

Eendimensionale- en tweedimensionale ruimte

Uit het model voor de eendimensionale ruimte is het volgende op te maken. Bij geen toegevoegde knooppunten tussen twee vaste knooppunten op positie 0 en 1 op het lijnstuk $[0,1]$ is verbinding mogelijk als de lengte van de straal $r \geq 1/2$ (zie *figuur 23*). Als één knooppunt is toegevoegd is sprake van een lineair verband tussen de lengte van straal r en de BedekkingsKans (zie *figuur 25*). Bij twee toegevoegde knooppunten is sprake van een kwadratisch verband tussen de lengte van de straal r en de BedekkingsKans (zie *figuur 29*). Uit het model voor de tweedimensionale ruimte valt het volgende op. Uit *figuur 33* valt op te maken hoe groter de lengte van de straal r rond een knooppunt, des te groter wordt de BedekkingsKans. Naarmate meer knooppunten n in een MANET aanwezig zijn, des de steiler loopt de curve. Uit *figuur 36* valt op te maken, dat hoe meer knooppunten worden gepositioneerd in een MANET, de BedekkingsKans sneller toeneemt. Naarmate de lengte van de straal r groter wordt, des te hoger komt de curve te liggen die het verband weergeeft tussen het aantal knooppunten n en de BedekkingsKans. Uit *figuur 37* valt op hoe groter de waarschijnlijkheid van de BedekkingsKans, des te hoger komt de curve te liggen dat het verband weergeeft tussen het aantal knooppunten n en de lengte van de straal r .

Toepassingen

Een nadeel van de bestaande mobiele netwerken is dat ieder land cq continent (USA, Europa, Japan) zijn eigen mobiel netwerk heeft, zodat communicatie onderling bijna niet mogelijk is. Dat kan alleen als bijvoorbeeld de mobiele telefoon hierop is aangepast, maar dat is vaak niet het geval. Het is bijvoorbeeld tot op heden niet mogelijk om vanuit Europa met een mobiele telefoon naar de Verenigde Staten te bellen. Ook de gebruikte frequenties in de Verenigde Staten zijn anders, dan die in Europa. Het ideale plaatje zou zijn als iedereen ter wereld zou communiceren over een en dezelfde frequentie (*universal frequency*). Een MANET zou op dit probleem in kunnen spelen, mits voldoende mobiele stations ter beschikking zijn. Verder kunnen MANETs kunnen erg goed functioneren in situaties waar geen vaste communicatiestructuur aanwezig is, zoals in Afrika. Andere toepassingen zijn militaire operaties in gebieden als Irak en Afghanistan en reddingsoperaties in gebieden als Thailand, Sri Lanka en Indonesië.

Verder onderzoek zou gedaan kunnen worden naar,

- de invloed van het verschil in snelheid tussen de mobiele stations op de BedekkingsKans?

- de invloed van obstakels op de BedekkingsKans?
- de invloed van disfunctionerende mobiele stations op de BedekkingsKans?
- de invloed van het verschil in fractie bewegelijkheid van het aantal mobiele stations op de BedekkingsKans?

Uit de opsomming hierboven is op te maken dat voldoende onderzoek gedaan kan worden naar de performance van een MANET. Een ding staan vast, het mondiale denken en de beweeglijkheid van de mensen zal verder bijdragen aan de ontwikkeling van nieuwe generaties mobiele netwerken.

Bijlagen

De volgende bijlagen worden onderscheiden:

- De script-files gebruikt voor het simulatiemodel in de tweedimensionale ruimte, uitgevoerd in S-PLUS en R,
- Grafieken voor onderzoeksvraag 1,
- Grafieken voor onderzoeksvraag 2.

Scripts voor de simulaties in 2-dim. ruimte

```
#-----#
# Auteur: Ing. Ronald v/d Meulen #
# Toename van het aantal knooppunten bij een vaste straal #
# Datum: 18 augustus 2004 #
#-----#
x<-0
M<-40
#tabel<-matrix(nrow=M,ncol=M)
y<-0
j<-0
verbinding<-0
k<-0
p<-0
d<-0
z<-0
aantalsimulaties<-10000
r<-0.1 #runif(1,0,0.5)# straal van een knooppunt
for (k in 2:M) { # M is het maximaal aantal knooppunten in een MANET
  connectie<-0
  for (l in 1:aantalsimulaties){
    #r<-runif(1)
    tabel<-matrix(nrow=k,ncol=k)
    verbinding<-0
    for (j in 1:k) {
      x[j]<-runif(1)
      y[j]<-runif(1)
    }
    for (j in 1:(k)) {
      for (l in 1:(k)) {
        if (sqrt((x[j]-x[l])^2+(y[j]-y[l])^2)<2*r) {
          tabel[j,l]<-1
        } else {
          tabel[j,l]<-0
        }
      }
    }
    if (tabel[1,k]==1) {
      verbinding<-verbinding+1
    } else if (k>2) {
      for (i in 2:(k-1)) {
        if (tabel[1,i]==1 && tabel[i,k]==1) {
          verbinding<-verbinding+1
        }
      }
    } else if (k>3) {
      for (i in 2:(k-1)) {
        for (j in 3:(k-1)) {
```

```

        if (i!=j && tabel[1,i]==1 && tabel[i,j]==1 &&
tabel[j,k]==1) {
            verbinding<-verbinding+1
        }
    }
} else if (k>4) {
    for (i in 2:(k-1)) {
        for (j in 3:(k-1)) {
            for (c in 4:(k-1)) {
                if (i!=j && j!=c && tabel[1,i]==1 &&
tabel[i,j]==1 && tabel[j,c]==1 && tabel[c,k]==1) {
                    verbinding<-verbinding+1
                }
            }
        }
    }
} else if (k>5) {
    for (i in 2:(k-1)) {
        for (j in 3:(k-1)) {
            for (c in 4:(k-1)) {
                for (f in 5:(k-1)) {
                    if (i!=j && j!=c && c!=f &&
tabel[1,i]==1 && tabel[i,j]==1 && tabel[j,c]==1 && tabel[c,f]==1 &&
tabel[f,k]==1) {
                        verbinding<-verbinding+1
                    }
                }
            }
        }
    }
} else if (k>6) {
    for (i in 2:(k-1)) {
        for (j in 3:(k-1)) {
            for (c in 4:(k-1)) {
                for (f in 5:(k-1)) {
                    for (g in 6:(k-1)) {
                        if (i!=j && j!=c && c!=f &&
f!=g && tabel[1,i]==1 && tabel[i,j]==1 && tabel[j,c]==1 && tabel[c,f]==1 &&
tabel[f,g]==1 && tabel[g,k]==1) {
                            verbinding<-
verbinding+1
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
} else if (k>7) {
    for (i in 2:(k-1)) {
        for (j in 3:(k-1)) {
            for (c in 4:(k-1)) {
                for (f in 5:(k-1)) {
                    for (g in 6:(k-1)) {
                        for (h in 7:(k-1)) {
                            if (i!=j && j!=c &&
c!=f && f!=g && g!=h && tabel[1,i]==1 && tabel[i,j]==1 && tabel[j,c]==1 &&
tabel[c,f]==1 && tabel[f,g]==1 && tabel[g,h]==1 && tabel[h,k]==1) {
                                verbinding<-
verbinding+1
                            }
                        }
                    }
                }
            }
        }
    }
}

```

```

    }
  }
} else if (k>8) {
  for (i in 2:(k-1)) {
    for (j in 3:(k-1)) {
      for (c in 4:(k-1)) {
        for (f in 5:(k-1)) {
          for (g in 6:(k-1)) {
            for (h in 7:(k-1)) {
              for (m in 8:(k-1)) {
                if (i!=j && j!=c
&& c!=f && f!=g && g!=h && tabel[1,i]==1 && tabel[i,j]==1 && tabel[j,c]==1
&& tabel[c,f]==1 && tabel[f,g]==1 && tabel[g,h]==1 && tabel[h,m]==1
&&tabel[m,k]==1){
                    verbinding<-verbinding+1
                }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
} else if (k>9) {
  for (i in 2:(k-1)) {
    for (j in 3:(k-1)) {
      for (c in 4:(k-1)) {
        for (f in 5:(k-1)) {
          for (g in 6:(k-1)) {
            for (h in 7:(k-1)) {
              for (m in 8:(k-1)) {
                for (r in 9:(k-
1)) {
                    if (i!=j
&& j!=c && c!=f && f!=g && g!=h && m!=r && tabel[1,i]==1 && tabel[i,j]==1
&& tabel[j,c]==1 && tabel[c,f]==1 && tabel[f,g]==1 && tabel[g,h]==1 &&
tabel[h,m]==1 &&tabel[m,r]==1 && tabel[r,k]==1){
                        verbinding<-verbinding+1
                    }
                }
            }
          }
        }
      }
    }
  }
} else if (k>10) {
  for (i in 2:(k-1)) {
    for (j in 3:(k-1)) {
      for (c in 4:(k-1)) {
        for (f in 5:(k-1)) {
          for (g in 6:(k-1)) {
            for (h in 7:(k-1)) {
              for (m in 8:(k-1)) {

```



```

for (j in 1:k) {
  x[j]<-runif(1)
  y[j]<-runif(1)
}
for (j in 1:(k)) {
  for (l in 1:(k)) {
    if (sqrt((x[j]-x[l])^2+(y[j]-y[l])^2)<2*r) {
      tabel[j,l]<-1
    } else {
      tabel[j,l]<-0
    }
  }
}
if (tabel[1,k]==1) { # Directe verbinding
  overlap<-overlap+1
}
else if (k>2) { # 2-stapspad inDirecte verbinding
  for (j in 2:(k-1)) {
    if (tabel[1,j]==1 && tabel[j,k]==1) {
      overlap<-overlap+1
    }
  }
}
else if (k>2) { # 3-stapspad
  for (j in 2:(k-1)) {
    for (m in 3:(k-1)) {
      if (tabel[1,j]==1 && tabel[j,m]==1 &&
tabel[m,k]==1) {
        overlap<-overlap+1
      }
    }
  }
} else if (k>2) { # 4-stapspad
  for (j in 2:(k-1)) {
    for (m in 3:(k-1)) {
      for (n in 4:(k-1)) {
        if (tabel[1,j]==1 && tabel[j,m]==1
&& tabel[m,n]==1 && tabel[n,k]==1) {
          overlap<-overlap+1
        }
      }
    }
  }
} else if (k>2) { # 5-stapspad
  for (j in 2:(k-1)) {
    for (m in 3:(k-1)) {
      for (n in 4:(k-1)) {
        for (o in 5:(k-1)) {
          if (tabel[1,j]==1 &&
tabel[j,m]==1 && tabel[m,n]==1 && tabel[n,o]==1 && tabel[o,k]==1) {
            overlap<-overlap+1
          }
        }
      }
    }
  }
}
if (overlap>=1) {
  verbinding<-verbinding+1
}
}
z[b]<-r

```

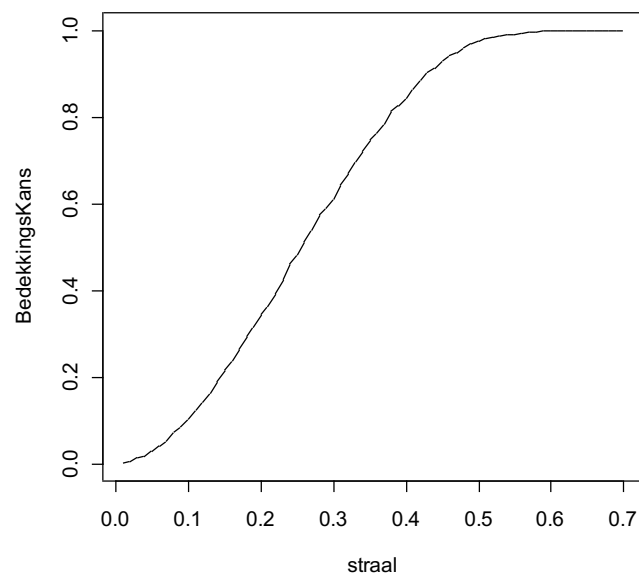


```
p[b]<-verbinding/aantalsimulaties
cat(b, "\n")
}
grafiek<-cbind(z[1:V],p[1:V])
grafiek
plot(grafiek,type="l",xlab="straal",ylab="BedekkingsKans")
#title("Overzicht van de BedekkingsKans")
```

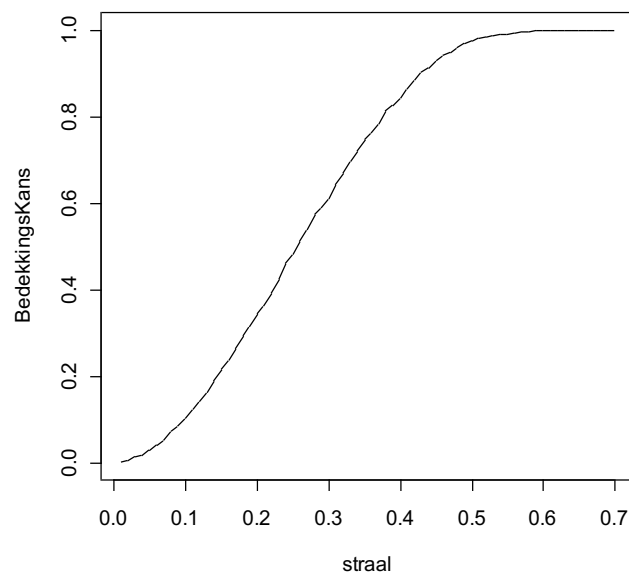
Grafieken onderzoeksvraag 1

Voor de aantallen knooppunten $n=2, 5, 10$ en 20 zijn de grafieken te zien tussen de lengte van de straal r en de bijbehorende BedekkingsKans,

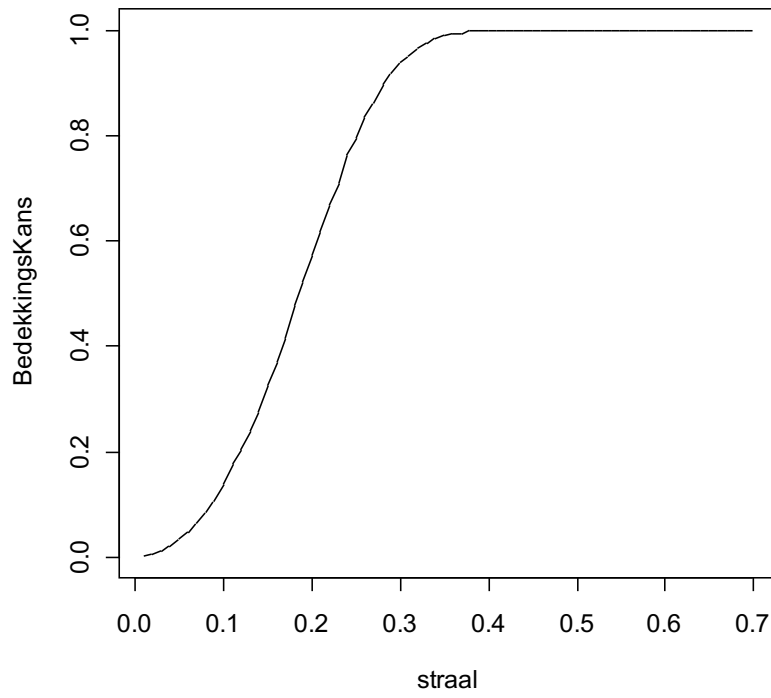
$n=2$



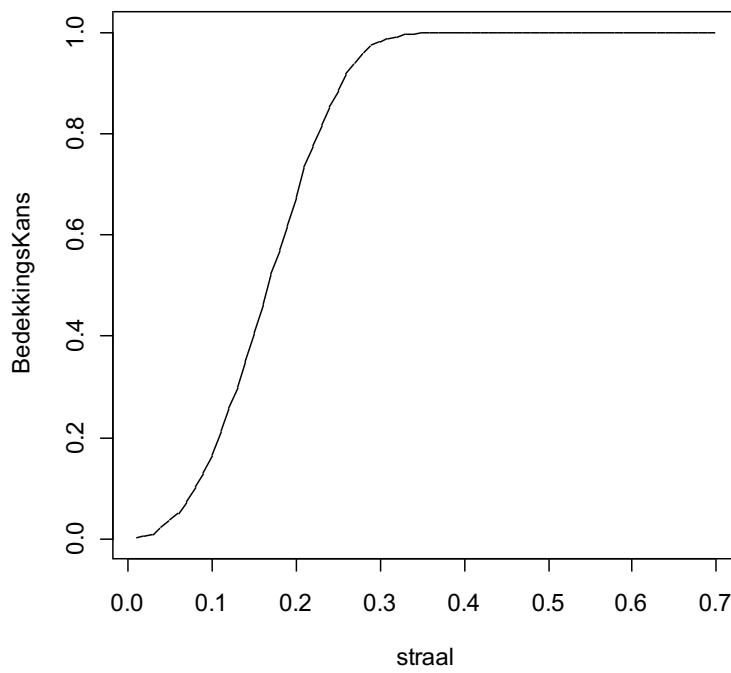
$n=5$



$n=10$



$n=20$

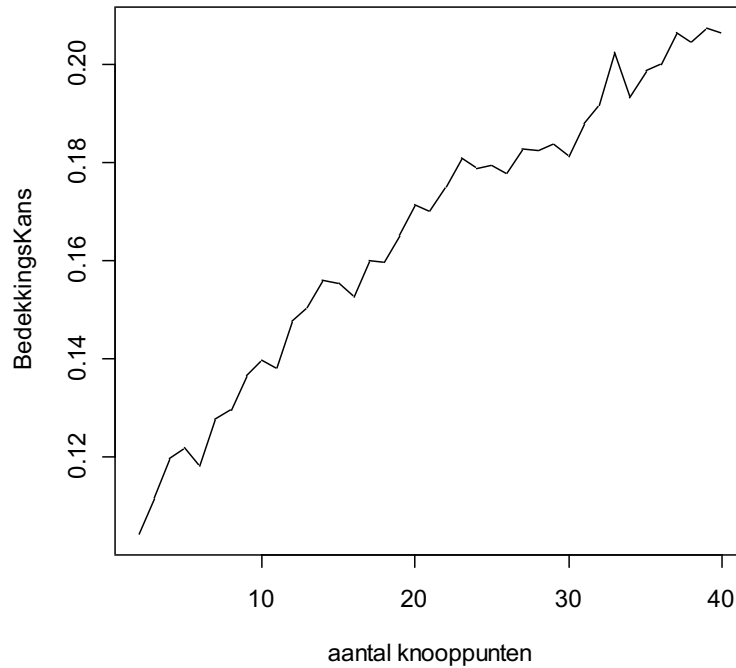


Grafieken onderzoeksvraag 2

Bij verschillende vaste lengten van de straal r zijn hieronder de grafieken te zien tussen het aantal knooppunten n en de bijbehorende BedekkingsKans,

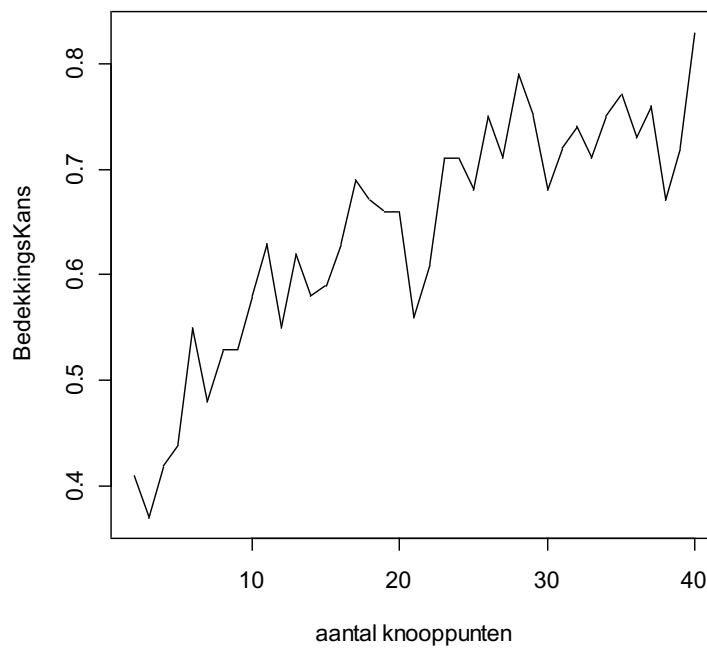
$$r = 0,1$$

Simulatieresultaten



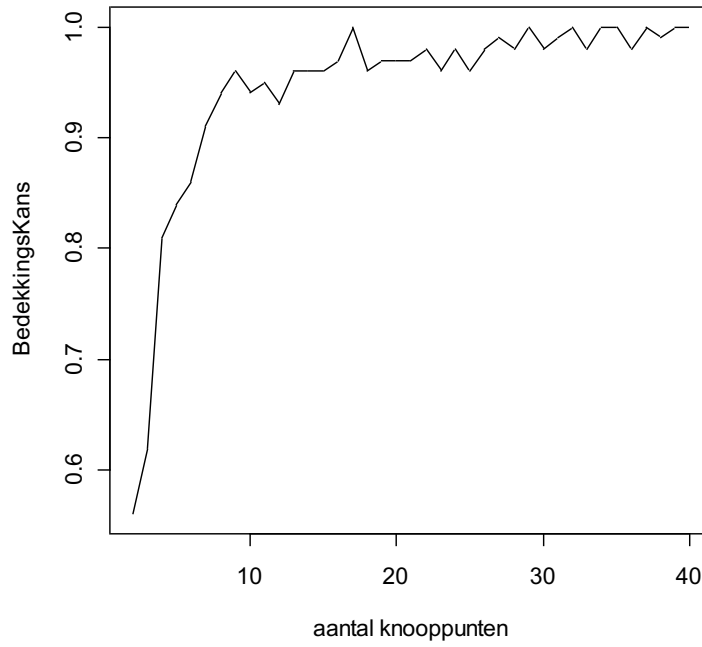
$$r = 0,2$$

Simulatieresultaten



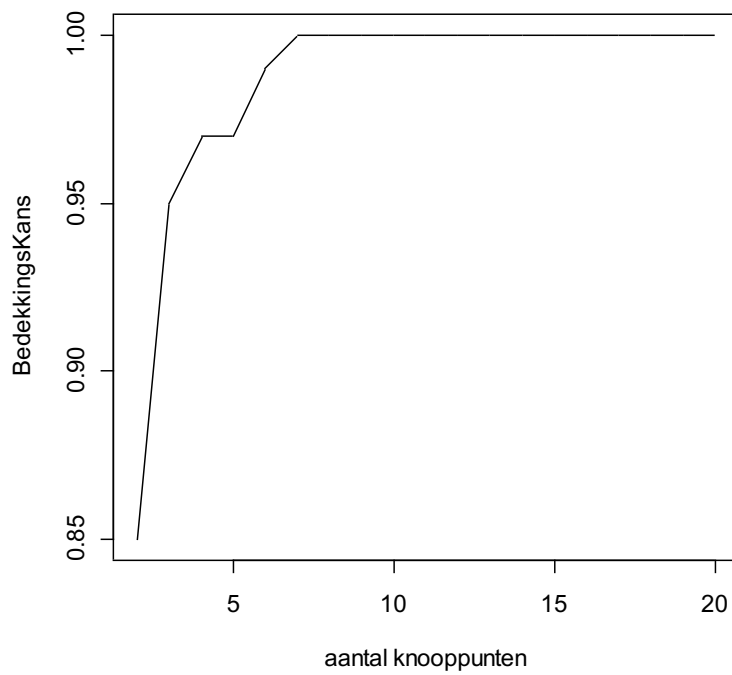
$$r = 0,3$$

Simulatieresultaten

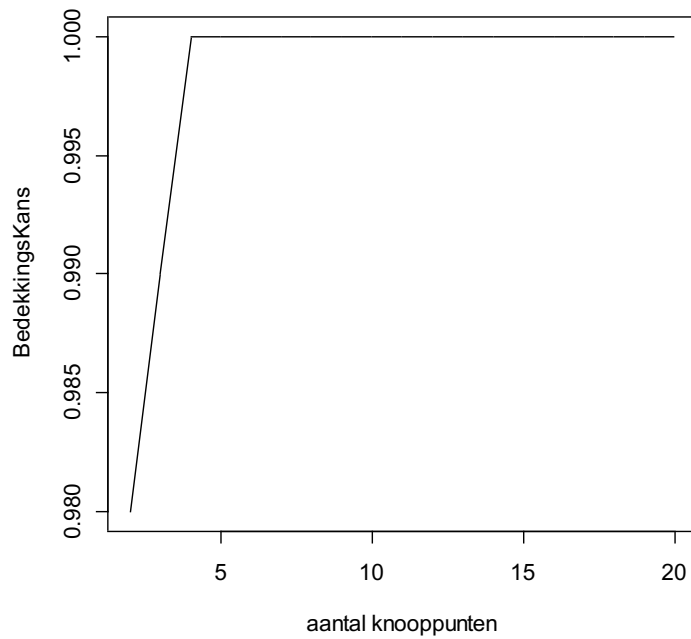


$$r = 0,4$$

Simulatieresultaten



$$r = 0,5$$

Simulatieresultaten

Bij toename van de lengte van de straal r verandert het lineaire verband met bijbehorende BedekkingsKans langzaam in een kwadratisch verband.

Bibliografie

- [1] Daniel Görge, Hannes Frey, Johannes K. Lehnert and Peter Sturm. *Marketplaces as Communication Pattern in Mobile Ad-hoc Networks*
- [2] David B. Johnson. *Routing in Adhoc Networks of Mobile Hosts.*
- [3] Eoin Curran and Jim Dowling. *Adhoc Internet Connectivity*
- [4] Sheldon Ross. *A First Course in Probability, chapter 5, 195-196*
- [5] Rob van der Mei. *Overzichtsartikel van het modelleren van netwerkverkeer,*
<http://www.cs.vu.nl/~mei>
- [6] Th.J.G. Derksen en H.W. Crins. *AIV Informatiekunde voor het HBO. 5^{de} geheel herziene uitgave. Hoofdstuk 7*
- [7] Fan Bai en Ahmed Helmy. *A Survey of Mobility Models in Wireless Adhoc Networks*
- [8] Alec Siu. *PICONET a wireless adhoc network for mobile handheld devices*
- [9] Lilian Goleniewski. *Telecommunications Essentials. The Complete Global Source for Communication. Fundamentals, Data Networking and the Internet, and next-Generation Networks. Chapter 14, 425-466*
- [10] H. Tijms. *Dictaat stochastische methoden voor BWI, voorjaar 2002.*

Lijst met figuren en grafieken

FIGUUR 1	BUSNETWERK	7
FIGUUR 2	GENERATIES MOBIELE NETWERKEN	10
FIGUUR 3	ANALOOG SIGNAAL	11
FIGUUR 4	DIGITAAL SIGNAAL	11
FIGUUR 5	OVERZICHT FREQUENTIESPECTRUM	12
FIGUUR 6	TIME DIVISION MULTIPLE ACCESS	13
FIGUUR 7	FREQUENCY DIVISION MULTIPLE ACCESS	13
FIGUUR 8	CODE DIVISION MULTIPLE ACCESS	13
FIGUUR 9	MOBIELE NETWERKEN MET EN ZONDER VASTE COMMUNICATIESTRUCTUUR	15
FIGUUR 10	CELLULAIR NETWERK	16
FIGUUR 11	IGP EN EGP ROUTERINGSROTOCOLLEN	17
FIGUUR 12	MANET	18
FIGUUR 13	DIRECTE COMMUNICATIE	18
FIGUUR 14	INDIRECTE COMMUNICATIE	18
FIGUUR 15	MANET MET 6 MOBIELE STATIONS	19
FIGUUR 16	CLASSIFICATIE ROUTERINGSROTOCOLLEN IN EEN MANET	20
FIGUUR 17	TOEPASSINGSGBIED REDDINGSOPERATIES	21
FIGUUR 18	TOEPASSINGSGBIED VEILIGHEIDSSYSTEMEN	22
FIGUUR 19	TOEPASSINGSGBIED INTELLIGENTE TRANSPORTSYSTEMEN	23
FIGUUR 20	HIËRARCHIE VAN BEWEEGLIJKHEIDSMODELLEN	24
FIGUUR 21	N KNOOPPUNTEN GEPOSITIONEERD IN DE EENDIMENSIONALE RUIMTE	25
FIGUUR 22	GEEN TOEGEVOEGDE KNOOPPUNTEN	26
FIGUUR 23	$F(0, r)$	26
FIGUUR 24	ÉÉN TOEGEVOEGD KNOOPPUNT	27
FIGUUR 25	$F(1, r)$	27
FIGUUR 26	TWEE TOEGEVOEGDE KNOOPPUNTEN	28
FIGUUR 27	XY-VLAK $1/6 \leq r < 1/4$	28
FIGUUR 28	XY-VLAK $1/4 \leq r < 1/2$	29
FIGUUR 29	$F(2, r)$	29
FIGUUR 30	VERBINDING (N=2)	30
FIGUUR 31	GEEN VERBINDING (N=2)	30
FIGUUR 32	VOORSTELLING VAN N=2,5 BIJ R KLEIN EN GROOT	31
FIGUUR 33	VERBAND TUSSEN DE LENGTE VAN DE STRAAL R EN DE BEDEKKINGSKANS	32
FIGUUR 34	DRIE-STAPSPAD	32
FIGUUR 35	TWEE-STAPSPAD	32
FIGUUR 36	VERBAND AANTAL KNOOPPUNTEN N EN DE BEDEKKINGSKANS	33
FIGUUR 37	90%, 95% EN 99% WAARSCHIJNLIJKHEID BEDEKKINGSKANS	33