

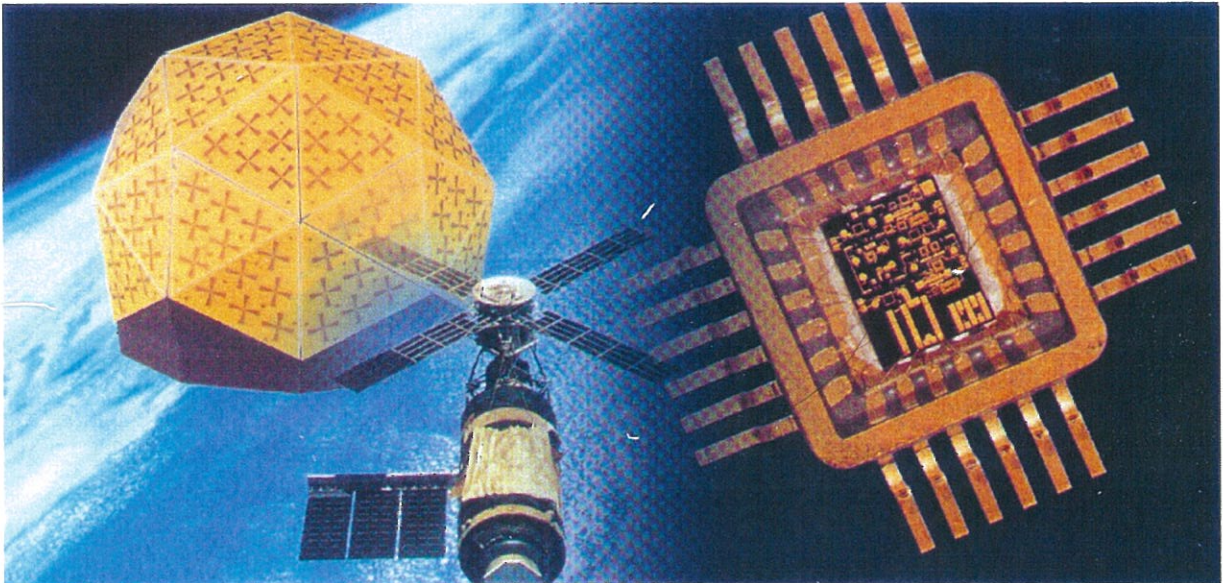
*Geïntegreerde proef 6<sup>de</sup> jaar Industriële Wetenschappen*

*V.T.I. Sint-Aloysius Torhout*

*Schooljaar 1999-2000*

*Klas 614*

# Satellietcommunicatie



*Mentors:*

*Degryse Karin*

*Verhaeghe Dirk*

*Door:*

*Vansteelant Joerie*

*Bauwens Tom*



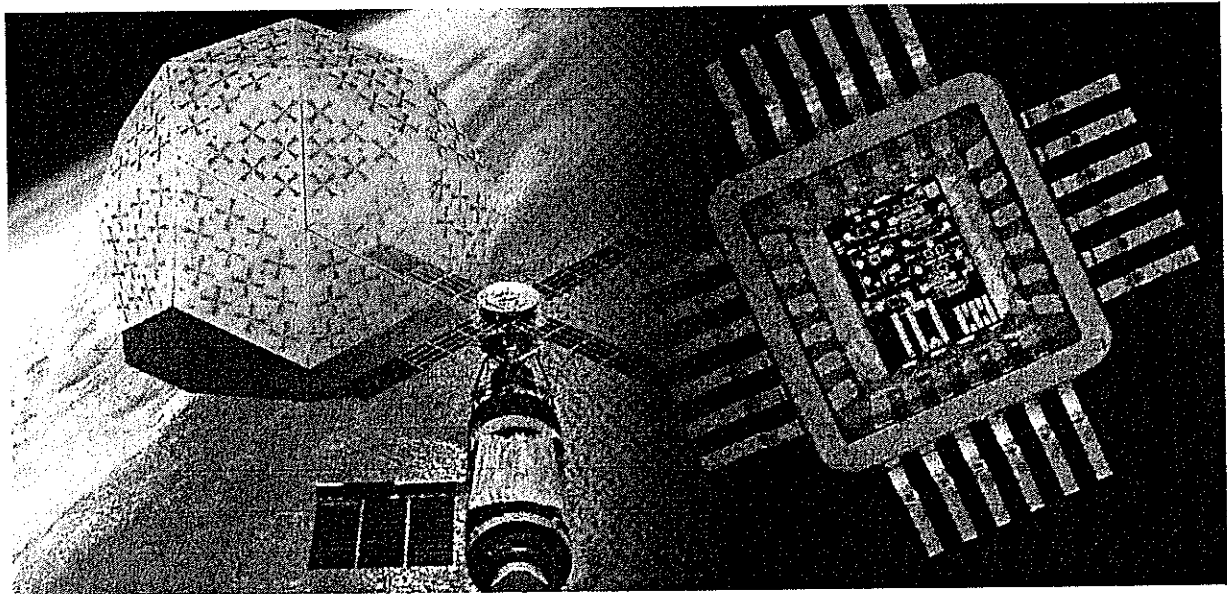
*Geïntegreerde proef 6<sup>de</sup> jaar Industriële Wetenschappen*

*V.T.I. Sint-Aloysius Torhout*

*Schooljaar 1999-2000*

*Klas 614*

# Satellietcommunicatie



*Mentors:*

*Degryse Karin*

*Verhaeghe Dirk*

*Door:*

*Vansteelant Joerie*

*Bauwens Tom*

# ***VOORWOORD***

Wij hebben van school uit de opdracht gekregen een geïntegreerde proef te maken, dit heeft geleid tot dit werk met als onderwerp satellietcommunicatie.

Satellietcommunicatie is ontstaan, zoals veel uitvindingen, door de drang naar sociaal contact, naar communicatie.

Aanvankelijk zijn we van de nodige documentatie voorzien door Mevrouw Degryse en Mijnheer Verhaeghe. Van daaruit hebben we verder gezocht in verschillende bibliotheken en op het internet.

Wij willen hierbij een speciaal woord van dank richten tot Mevrouw Degryse en Mijnheer Verhaeghe voor het verbeteren en het bijsturen van de geïntegreerde proef.

Wij hopen dat dit werk als naslagwerk kan gebruikt worden door al wie wegwijs wil worden in de wereld van de satellietcommunicatie.

Torhout, 24 mei 2000

# INHOUD

<i>VOORWOORD</i>	<u>1</u>
<i>INLEIDING</i>	<u>5</u>
<i>HOOFDSTUK 1: EVOLUTIE VAN DE SATELLIETCOMMUNICATIE</i>	
1.1 Ontstaan	<u>6</u>
1.1.1 Radioverbindingen	<u>6</u>
1.1.2 Kabelverbindingen	<u>6</u>
1.1.3 Satellietverbindingen	<u>7</u>
1.2 Principe	<u>7</u>
1.3 Soorten satellieten	<u>7</u>
1.3.1 Satellieten als ruimtestation	<u>7</u>
1.3.2 Observatiesatellieten	<u>8</u>
1.3.3 Communicatiesatellieten	<u>8</u>
1.4 De soorten omloopbanen	<u>10</u>
1.4.1 De verschillende satellietbanen	<u>10</u>
1.4.2 De geostationaire satellietbaan	<u>11</u>
1.5 Van spoetnik tot intelsat	<u>15</u>
1.5.1 Het begin	<u>15</u>
1.5.2 Amerikaanse communicatiesatellieten	<u>17</u>
1.5.3 Russische communicatiesatellieten	<u>24</u>
1.5.4 Intelsat satellieten	<u>27</u>
1.5.5 Andere landen	<u>29</u>
<i>HOOFDSTUK 2: TECHNIEK VAN DE SATELLIETCOMMUNICATIE</i>	
2.1 Coördinaten van een satelliet	<u>34</u>
2.1.1 Azimut - en elevatiehoek	<u>34</u>
2.1.2 Geometrische gegevens	<u>35</u>
2.2 De Microgolven	<u>37</u>
2.2.1 Het elektromagnetisch spectrum	<u>38</u>
2.2.2 Specifieke eigenschappen van micrigolven	<u>39</u>
2.2.3 Golfengte en frequentie	<u>39</u>
2.2.4 De microgolfbanden	<u>40</u>
2.2.5 Skineffect	<u>40</u>
2.2.6 Microgolven en veiligheid	<u>41</u>

2.3	De satelliet (het ruimtesegment)	42
2.3.1	Het logistiek platform	42
2.3.2	De nuttige last	42
2.4	De Up- en downlink	48
2.4.1	Het verzenden en ontvangen van satelliet signalen	48
2.4.2	Het verzorgingsgebied van een satelliet	50
2.4.3	Downlink – budget	52
2.5	Versterking	56
2.5.1	De bouw van een transistor	56
2.5.2	Werking van een transistor	56
2.6	Modulatie	59
2.6.1	Algemene principes	59
2.6.1	Amplitude modulatie	60
2.6.3	SSB (Single Side Band)	62
2.6.4	Hoekmodulatie	62
2.7	Microgolfantennes	66
2.7.1	Inleiding	66
2.7.2	Het isotrope antennemodel	67
2.7.3	Het nabije en het verre veld	67
2.7.4	Antenne-impedantie	68
2.7.5	Dipool-elementen	69
2.7.6	Directiviteit	70
2.7.7	Antenneversterking	72
2.7.8	Hoornstralers	74
2.7.9	Reflectorantennes	75
2.7.10	Parabolische schotelantennes	76

### *HOOFDSTUK 3: TOEPASSINGEN VAN DE SATELLIETCOMMUNICATIE*

3.1	Mobiele satellietcommunicatie	81
3.1.1	Overzicht	81
3.1.2	Geostationaire satelliet systemen	83
3.1.3	Niet-geostationaire satelliet systemen	91
3.2	Teledesic	95
3.2.1	Overzicht	96
3.2.2	Teledesic Netwerk	96
3.2.3	Lage baan satelliet systemen	97
3.2.4	De handel van Teledesic	98
3.2.5	Techniek	99

3.3 Global Positioning System	101
3.3.1 Inleiding	101
3.3.2 De opbouw van het GPS-systeem	103
3.3.3 De werking van het GPS-systeem	105
3.3.4 Nut van GPS	110
3.4 Satelliet-TV	114
3.4.1 Het signaal van antenne tot beeldbuis	114
3.4.2 Voorbeelden van systemen bij satelliet-TV	116
3.4.3 Televisiesystemen	118
<i>BESLUIT</i>	<i>124</i>
<i>APPENDIX</i>	<i>125</i>
<i>BIBLIOGRAFIE</i>	<i>127</i>
<i>LOGBOEK</i>	<i>129</i>

## ***INLEIDING***

Satellietcommunicatie biedt als enige de mogelijkheid om op elke plaats ter wereld te communiceren. Er ontstaan als maar meer toepassingen van satellietcommunicatie. Daar het niet mogelijk is om deze allemaal te bespreken hebben we er naar onze mening de interessantste en meest toekomstgerichte toepassingen uitgehaald. Om deze toepassingen zeer goed te begrijpen zal het eerst nodig zijn om de principes en de algemene techniek van satellietcommunicatie te begrijpen.

In het eerste hoofdstuk is vooral ingegaan op het principe, het nut en de geschiedenis van de satellietcommunicatie. Het is hier vooral de bedoeling om via een overzicht te laten zien hoe de satellietcommunicatie geëvolueerd is. Alleen de meest essentiële technische elementen die nodig zijn om satellietcommunicatie tot stand te brengen werden in een tweede hoofdstuk besproken. Om een idee te krijgen van de hedendaagse toepassingen op het gebied van satellietcommunicatie hebben we er in hoofdstuk drie enkele besproken.



# HOOFDSTUK 1: EVOLUTIE VAN DE

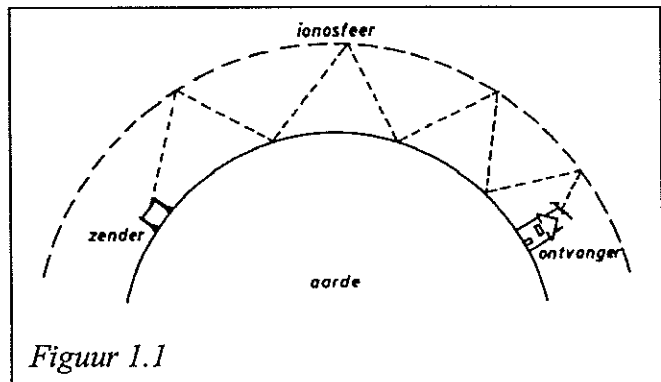
# SATELLIETCOMMUNICATIE

## 1.1 Ontstaan

In de tweede helft van de twintigste eeuw werd de behoefte aan wereldwijde, transatlantische telecommunicatie steeds groter. Men zocht dus naar technieken om deze zeer grote afstanden te overbruggen.

### *1.1.1 Radioverbindingen*

Toen Marconi in 1901 zijn eerste radioboodschap uitzond maakte hij gebruik van de reflecterende eigenschappen van de ionosfeer (een laag van de atmosfeer die zich uitstrekt van ongeveer 70 tot 500 km boven de aarde en waarin voldoende geladen deeltjes of ionen voorkomen om de voortplanting van elektromagnetische golven te



bevorderen). De radiogolven in het frequentiegebied dat hij gebruikte konden daardoor grote afstanden afleggen. Ze weerkaatsen tegen de ionosfeer en weer terug tegen de aarde, soms meerdere malen voordat ze het ontvangststation bereikten (zie *Figuur 1.1*). De kwaliteit was door de grilligheid van de ionosfeer zeer klein.

### *1.1.2 Kabelverbindingen*

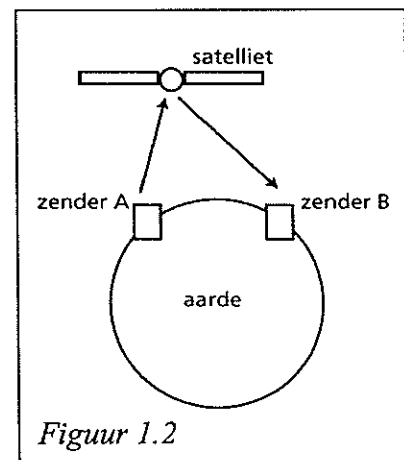
De transatlantische telefoonkabel bood en biedt nog steeds een oplossing. In 1956 werd de eerste telefoonkabel op de bodem van de Atlantische oceaan gelegd. Eerst gebruikte men een koperverbinding als kabel, later werd deze vervangen door glasvezel. Maar intercontinentale kabelverbindingen zijn erg duur wegens de kosten van de aanleg van de kabels. Daarom is men steeds verder blijven zoeken naar goedkopere alternatieven.

### ***1.1.3 Satellietverbindingen***

Men ontdekte dat via zogenaamde microgolven zeer veel informatie kan worden getransporteerd zonder veel kwaliteitsverlies. Het enige probleem met deze microgolven is dat ze zich rechtlijnig voortplanten en zich niet laten terugkaatsen door de ionosfeer. Zender en ontvanger moeten elkaar bij een dergelijke verbinding kunnen zien wat, door de ronde vorm van de aarde, een probleem is. Indien men de Atlantische oceaan wil oversteken dan zouden zender en ontvanger op een toren van 760 km hoogte moeten staan, wat natuurlijk onmogelijk is. De oplossing hiervoor is een zwevende zendmast of een kunstmatige satelliet op zeer grote hoogte.

## **1.2 Principe**

Satellietcommunicatie is in principe zeer eenvoudig: een zender A, opgesteld op een bepaalde plaats op aarde, straalt een elektromagnetisch signaal naar een zender/ontvanger in de ruimte (de kunstmaan of satelliet), die het signaal na ontvangst terugzendt waar het door een ontvanger B wordt opgevangen. De satelliet werkt dus als een relaisstation bij de transmissie van signalen over zeer grote afstanden en brengt op die manier de verbinding tot stand tussen twee ver van elkaar verwijderde punten. (zie *Figuur 1.2*)



*Figuur 1.2*

## **1.3 Soorten satellieten**

Om een goed beeld te kunnen hebben van de toepassingsmogelijkheden van satellieten is het noodzakelijk om een onderscheid te maken tussen de verschillende soorten, in functie van hun technische karakteristieken en van hun gebruik.

### ***1.3.1 Satellieten als ruimtestation***

Satellieten gebruikt als ruimtestation kunnen van zeer diverse aard zijn en voor veel toepassingen worden ingeschakeld.

- Een eerste voorbeeld van dergelijke satellieten situeert zich op het militaire vlak, de zogenaamde anti-satelliet-satellieten of killer satellites, waarmee zowel in het westen als in het oosten wordt geëxperimenteerd. Dit zijn kunstmanen met wapens of elektronische ontregelingsapparatuur aan boord, met het doel communicatie -of andere satellieten in de ruimte uit te schakelen.
- Een ander voorbeeld is het eveneens experimentele Solar Satellite Power System (SSPS), waarbij kunstmanen worden ingeschakeld als energiecentrale. Het systeem bestaat erin zonne-energie in de ruimte op te vangen via enorme zonnepanelen en om te zetten in elektrische energie, die dan weer in de vorm van microgolven naar de aarde gezonden en in energiecentrales opgeslagen wordt.

### ***1.3.2 Observatiesatellieten***

Observatiesatellieten zijn uitgerust met allerlei opname -en meetapparatuur, zoals camera's en telescopen. Ze worden ingeschakeld voor de observatie van de aarde of van de ruimte.

- Veruit het grootste aantal observatiesatellieten wordt gebruikt voor militaire doeleinden, namelijk voor observatie van vijandelijke militaire en industriële doelen.
- Een ander soort observatiesatellieten zijn de wetenschappelijke satellieten, waarvan de bekendste ongetwijfeld de weersatellieten zijn, zoals de Europese Meteosat -en de Amerikaanse NOAA satellieten. Andere voorbeelden van wetenschappelijke satellieten zijn geologische en astronomische satellieten.

### ***1.3.3 Communicatiesatellieten***

Onze aandacht gaat natuurlijk in eerste instantie uit naar satellieten die worden gebruikt voor telecommunicatie.

Men kan in functie van de toepassing globaal twee verschillende soorten onderscheiden: telecommunicatiesatellieten (ook nog satellieten voor vaste diensten genoemd) en omroepsatellieten (ook nog televisiesatellieten of satellieten voor directe TV-uitzending of in het Engels Direct Broadcasting Satellites genoemd).

In dit werk zullen we vooral de communicatiesatellieten bespreken.

### 1.3.3.1 Telecommunicatiesatellieten

Een telecommunicatiesatelliet verzorgt in het algemeen tweerichtingsverkeer tussen een beperkt aantal, meestal grote en kostbare grondstations. De communicatie verloopt gericht, dus van punt tot punt.

Toepassingen hiervan zijn:

- telefoon/fax (over lange afstanden)
- datacommunicatietoepassingen
- teleconferencing
- uitwisselen van radio -en TV-signalen

### 1.3.3.2 Omroepsatellieten

De signalen van Direct Broadcasting Satellites (DBS) of omroepsatellieten zijn (zoals de term “omroep” reeds aanduidt) bestemd voor een grote groep gebruikers die deze signalen kunnen ontvangen door middel van individuele (parabool)antennes met een diameter van ongeveer 1 meter. Dit betekent dat het uitgezonden signaal over het algemeen krachtiger is bij een omroepsatelliet dan bij een telecommunicatiesatelliet, doordat het uitgestraalde vermogen van de satelliet (uitgedrukt in Watt) bepalend is voor de omvang van de ontvangstantenne: hoe groter het vermogen hoe kleiner de antenne mag zijn.

De DBS-band (ook reeds aangeduid als Ku-2 band) loopt van 11,75 tot 12,5 GHz en is opgedeeld in 40 kanalen, waarvan de helft met linksdraaiende en de andere helft met rechtsdraaiende polarisatie (zie 2.3.2). Alle (Europese) DBS-satellieten zenden uit in een van de varianten van de MAC-norm, zodat voor de ontvangst ervan een speciale ontvanger vereist is.

Er werden door de International Telecommunication Union (ITU) een aantal overeenkomsten gemaakt betreffende omroepsatellieten over o.a. de regio's, het aantal kanalen en het vermogen.

In de toekomst zullen de omroepsatellieten meer en meer gebruikt worden in dunbevolkte gebieden of gebieden waar er zeer weinig bekabeling is. Het meeraanbod via rechtstreekse satellietontvangst zal in België waarschijnlijk niet erg groot zijn, doordat de

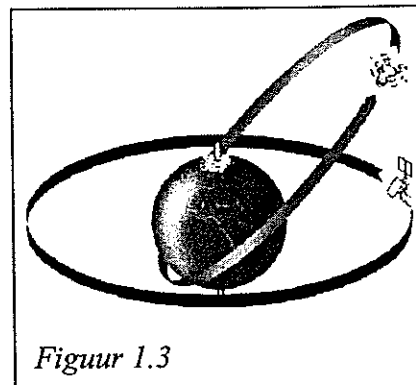
bekabelingsgraad zeer hoog is en een groot deel van de satellietprogramma's door de kabelmaatschappijen zal worden doorgegeven. Veruit het merendeel van het huidige aanbod aan televisieprogramma's kan niet via een paraboolantenne worden ontvangen. Een paraboolantenne zal dus geen alternatief, maar een supplement van het kabelabonnement zijn.

## **1.4 De soorten omloopbanen**

Satellieten kunnen, afhankelijk van hun taak in verschillende omloopbanen worden gebracht, waarbij de baanhoogten kunnen verschillen.

### ***1.4.1 De verschillende satellietbanen***

- De eerste generaties satellieten werden in een vrij lage baan om de aarde gebracht. Ze vlogen in 1 à 1,5 uur rond de aardbol, waardoor het contact met de grondstations slechts gedurende een korte periode mogelijk was. Om 24 uur contact te houden tussen Europa en de Verenigde Staten waren er bijvoorbeeld 50 kunstmanen nodig. De oplossing voor dit probleem werd in de jaren veertig reeds beschreven in artikels van wetenschapper en science fiction auteur Arthur C. Clarke: de geostationaire satelliet (zie 1.4.2).
- Wanneer men nu echter met mobiele toestellen wil werken dan zal men niet kunnen werken met een satelliet in de geostationaire baan doordat de antennes zeer klein en dus minder krachtig zijn. Men heeft daarom een netwerk van satellieten opgebouwd die in een zeer lage baan rond de aarde zweven (op circa 1000 km hoogte). Dankzij de lage baan van de satellieten kunnen de gebruikers zeer kleine, goedkope antennes gebruiken, terwijl de verbindingen ook snel tot stand kunnen komen.
- Met een satelliet in de geostationaire baan kan men het de poolgebieden niet bereiken. De Russen gebruiken hiervoor een sterk excentrische baan onder een hoek van circa  $65^\circ$  met de evenaar (zie *Figuur 1.3*), waarin een aantal actieve Molnya satellieten op ongeveer even grote tussenruimte op het noordelijk halfrond voor 24 uur communicatie kunnen zorgen. Vroeger werden



*Figuur 1.3*

hiervoor polaire banen gebruikt, maar deze satellieten konden niet zo een groot uitzendoppervlak bestrijken.

#### 1.4.2 De geostationaire satellietbaan

Indien men met een zelfde satelliet 24 uur contact wil houden met de aarde dan zal men de satelliet in een geostationaire baan (of baan van Clarke) moeten brengen. Dit is een cirkelvormige baan boven de evenaar die dezelfde rotatiesnelheid heeft als de aarde. Vanop aarde gezien blijft de satelliet dus altijd op dezelfde plaats hangen.

Als men de satelliet in een vaste baan om de aarde wil brengen, dan zal de aantrekkingskracht van de aarde gelijk moeten zijn aan de middelpuntvliedende kracht die de satelliet ondervindt, met andere woorden:  $F = K$  (1.1)

De derde wet van Kepler, die hierop betrekking heeft, luidt:

$$K = \gamma \cdot (m \cdot M)/R^2$$

$$F = (4\pi^2 \cdot m \cdot R)/T^2$$

Hierin zijn:

- K: aantrekkingskracht van de aarde
- F: middelpuntvliedende kracht die de satelliet ondervindt
- $\gamma$ : gravitatieconstante:  $\gamma = 6,67 \cdot 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$
- m: massa van de satelliet
- M: massa van de aarde:  $M = 5,977 \cdot 10^{24} \text{ kg}$
- R: afstand van de satelliet tot het middelpunt van de aarde

$$R = r + h \tag{1.2}$$

r = straal van de aarde = 6370 km

h = hoogte van de satelliet boven het aardoppervlak

- T: omlooptijd van de satelliet

In dit geval zal de omlooptijd van de satelliet 24 uur (= 86400 s) bedragen, waardoor men de hoogte van de satelliet boven het aardoppervlak kan berekenen door de vergelijking (1.1):

$$(4\pi^2 \cdot m \cdot R) / T^2 = \gamma \cdot (m \cdot M) / R^2$$

En daaruit:

$$R^3 = (\gamma \cdot M \cdot T^2) / 4\pi^2$$

Door invullen:

$$R = 42\,243\,408 \text{ m} = 42\,243,408 \text{ km}$$

Uit vergelijking (1.2) volgt:

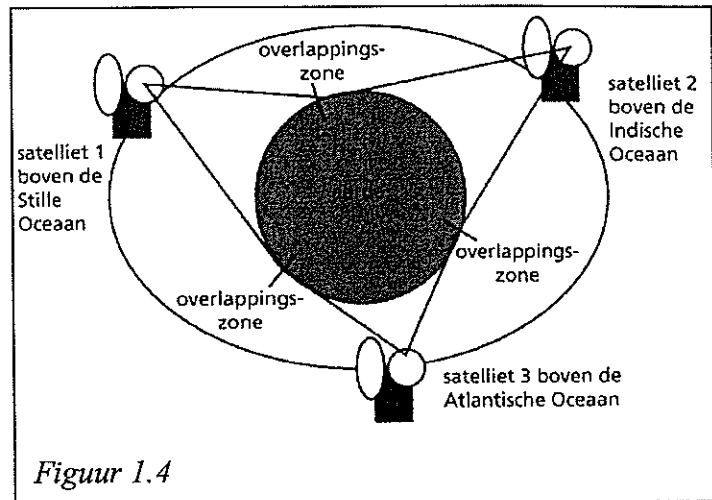
$$h = R - r = 42\,243,408 \text{ km} - 6370 \text{ km} = 35\,873,408 \text{ km}$$

Een satelliet op een geostationaire baan zal dus op een hoogte van ongeveer 36 000 km boven de evenaar moeten hangen. Van dit principe vertrekt men om een wereldwijde dienstverlening voor telecommunicatie aan te bieden.

#### 1.4.2.1 Voordelen

Het grote voordeel van de geostationaire satelliet is het feit dat met slechts drie satellieten het hele aardoppervlak met uitzondering van de poolgebieden (waarvoor men een andere soort baan zal gebruiken) kan worden bestraald. Elke satelliet neemt ongeveer 42 procent van het totale aardoppervlak in beslag. Intelsat maakt gebruik van dit principe om een wereldwijde dienstverlening voor telecommunicatie aan te bieden. Door drie satellieten op een geostationaire baan met een onderlinge afstand van 120° te plaatsen kan bijna de volledige aardbol worden voorzien van communicatiesatellieten (*zie Figuur 1.4*). Elke regio wordt genoemd naar de oceaan die zich in het bestralingsgebied bevindt: de Atlantic Ocean Region (AOR), de Indian Ocean Region (IOR) en de Pacific Ocean Region (POR).

Doordat elke satelliet ongeveer 42 procent van het aardoppervlak bestrijkt, zijn er zogenaamde overlappingszones. De satellieten worden zodanig gepositioneerd dat de streken met de grootste verkeersdichtheid (Europa, Verenigde Staten, Japan) zich in de overlappingszones bevinden. Deze



landen kunnen door middel van twee antennes toegang hebben tot twee bestralingsgebieden. Zo hebben België en Nederland toegang tot een AOR- en IOR-satelliet. De ligging binnen een overlappingszone heeft het bijkomende voordeel dat sommige bestemmingen (voor België bijvoorbeeld zijn dit de Afrikaanse landen en Israël) via twee verschillende wegen kunnen bereikt worden (wat diversity-ontvangst genoemd wordt). Een ander voordeel van de geostationaire baan (maar dit geldt ook voor andere satellietverbindingen) is dat de radiogolven zich hoofdzakelijk buiten de aardse atmosfeer voortplanten en dus minder worden beïnvloed door atmosferische storingen.

#### 1.4.2.2 Nadelen

Door het feit dat een signaal een enorme weg moet afleggen (72 000 kilometer) tijdens de communicatie via een satelliet, verloopt er een bepaalde tijd tussen verzending en ontvangst. Deze zogenaamde propagatietijd van een signaal kan soms storend werken bij real time communicatie (zoals bij een telefoongesprek of videoconferencing). De radiogolven die als transportmiddel voor de informatie fungeren, planten zich voort met de snelheid van het licht, namelijk 300 000 kilometer per seconde (vergelijk: de snelheid van het geluid bedraagt “slechts” 1223 kilometer per uur = 20,38 kilometer per seconde). Er is dus een “vertraging” (tussen verzending en ontvangst) van 0,24 seconden. Daarbij komt de tijd om het signaal over te brengen (bijvoorbeeld via straalverbindingen of kabel distributie) van het grondstation tot aan de plaats van ontvangst (bijvoorbeeld tot bij de telefoonabonnee). Daardoor kan de totale vertraging oplopen tot circa 0,5 seconde.

De kosten om de satelliet in een (hoge) geostationaire baan te brengen, zijn zeer hoog omdat krachtige (en dus dure) draagraketten nodig zijn (zoals de Ariane-raket). Na de



lancering wordt de satelliet eerst in een ellipsvormige “parkeerbaan” gebracht, op enkele honderden kilometer hoogte (het perigeum). Daarna wordt de apogeummotor ontstoken die de koers zodanig corrigeert, dat de baan cirkelvormig wordt op 36 000 kilometer (het apogeum).

Een ander nadeel van de geostationaire satelliet is de aanzienlijke verzwakking (demping) van de signalen vanwege de grote afstanden die moeten worden afgelegd, waardoor krachtige versterkers vereist zijn. Aangezien de satelliet geen eindstation is maar een relaisstation, komt deze demping tweemaal voor (tijdens uplink en downlink). Vandaar de noodzaak om het signaal eerst te versterken bij de verzending, vervolgens op het niveau van de satelliet en tenslotte bij de ontvangst.

Voor de energievoorziening wordt gebruik gemaakt van zonnecellen. Een geostationaire satelliet komt echter gedurende een bepaalde periode van het seizoen (namelijk in de lente en de herfst) in de schaduw van de aarde terecht. Dit noemt men de eclips. Deze eclipsen vinden ‘s nachts plaats gedurende een periode van 44 dagen en duren maximaal een uur. Het wegvallen van de zonne-energie moet dan worden overbrugd door energie van (zware) batterijen.

Ook stelt zich het probleem van de zogenaamde “station keeping”. Onder invloed van de gravitatiekracht van de aarde en de maan dreigt de satelliet soms op drift te slaan. Om de satellietbaan te corrigeren, worden motoren ontstoken die de kunstmaan weer in een goede baan leiden. Dit corrigeren gebeurt vanuit de grondstations aan de hand van telemetrie-signalen. Normaal gebeurt dit niet meer dan éénmaal per jaar. Vermits de hoeveelheid brandstof beperkt is, heeft de satelliet een beperkte levensduur van 7 à 10 jaar. Deze levensduur is trouwens ook beperkt door het feit dat de zonnepanelen na verloop van tijd aan capaciteit moeten inboeten, omdat steeds meer zonnecellen sneuvelen onder het “bombardement” van allerlei rondzwevende objecten in de ruimte.

Men zou zich tenslotte de (logische) vraag kunnen stellen of de geostationaire baan op termijn niet overbevolkt geraakt. Momenteel zijn er zo’n 500 geostationaire satellieten in gebruik. Toch is de capaciteit van de geostationaire baan aanzienlijk. De omtrek van de baan van Clarke is circa 250 000 kilometer. Indien de satellieten zich op 1 kilometer van elkaar zouden bevinden, is er dus plaats voor ongeveer 250 000 satellieten. Deze bijna onbeperkte ruimte geldt echter niet voor de frequenties voor satellietcommunicatie. Twee satellieten die met dezelfde frequentie uitzenden, moeten ongeveer 3° in lengte van elkaar verwijderd zijn. Door allerlei technieken (zoals polarisatie) kan deze afstand worden

verkleind tot circa 0,50. De frequentiebanden 6/4 GHz en 14/12 GHz zijn momenteel vrijwel verzadigd. Daarom zal men voor de eerstkomende jaren en decennia andere frequentiebanden moeten aanspreken.

Door de zeer grote hoogte zijn zeer krachtige - en dure - zenders (grondstations) nodig voor de uplink. Daarom worden, bij toepassingen waarbij gebruik moet worden gemaakt van zeer kleine uplink-antennes (zoals bij LMSS), satellieten ingeschakeld die zich in een lage baan om de aarde bevinden, de zogenaamde LEO's (Low Earth Orbit-satelliet).

## **1.5 Van spoetnik tot intelsat**

### ***1.5.1 Het begin***

In 1949 werden er al experimenten gedaan met telecommunicatieverbindingen uit de ruimte, eerst met sondeerraketten die op een hoogte van ongeveer 400 km radiosignalen naar de aarde zonden. In 1954 werden door de Amerikaanse marine (U.S. Naval Research Laboratory) radiosignalen verzonden naar de maan die dan als reflector diende om signalen terug naar de aarde te verzenden. De theoretische mogelijkheden van kunstmanen voor communicatiedoeleinden werden verder bestudeerd door John Pierce van de Bell Telephone Laboratories. Pierce gaf voor communicatie via satellieten twee mogelijkheden aan: de reflectie van signalen met behulp van passieve satellieten en het heruitzenden van signalen met actieve satellieten. Uit latere experimenten bleek dat beide technieken functioneerden.

Een historische dag voor de ruimtevaart was 4 oktober 1957. Toen werd de eerste kunstmaan Spoetnik 1 (zie *Figuur 1.5*) gelanceerd. Het was de eerste geslaagde lancering van een satelliet ter wereld. De satelliet was



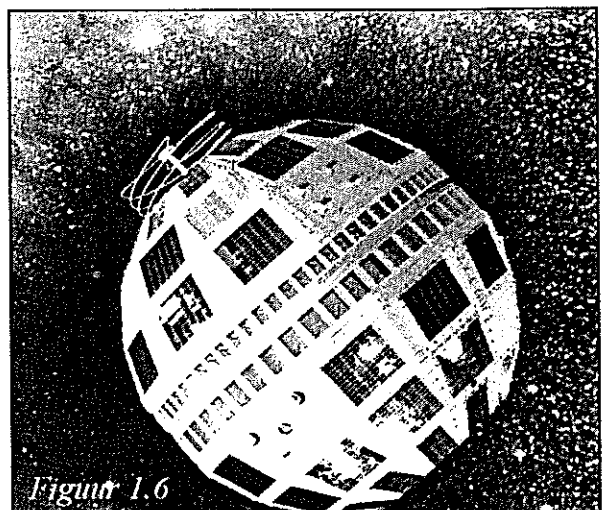
vernoemd naar de Russische uitdrukking Spoetnik Zembli, dat medereiziger van de wereld betekent. Het was een kleine kunstmaan van slechts 58 cm doorsnede. De Spoetnik deed 92,6 minuten over zijn baan om de aarde en gaf informatie door over de atmosfeer. Met behulp van een ingebouwde zender met een vermogen van 1 Watt werd een regelmatig pieptoontje vanuit de satelliet naar de aarde gezonden. De zender in de Spoetnik heeft 21

dagen gewerkt. Toen was de elektrische energiebron uitgeput. De zender in de Spoetnik zelf bleef nog een tijd lang in de baan om de aarde draaien. Op 4 januari 1958 verbrandde deze eerste kunstmaan in de atmosfeer van de aarde.

Na enkele mislukte pogingen slaagden de Amerikanen erin om ook hun eerste kunstmaan te lanceren. Op 18 december 1958 lanceerden ze onder leiding van Werner Von Braun de Score (Signal Communications Orbit Relay Equipment). Hierbij werd een vooraf opgenomen bandje met een kerstboodschap van president Eisenhower uitgezonden. Op 30 december viel de Score eveneens weg bij gebrek aan energie.

Tot hiertoe werden de kunstmanen enkel gebruikt voor het uitzenden van signalen. De volgende stap was het terugkaatsen/heruitzenden van een op aarde opgestraald signaal. De eerste passieve satelliet, de Echo-1, werd op 12 augustus 1960 gelanceerd door de NASA (National Aeronautics and Space Administration). De Echo 1 en 2 waren grote reflecterende ballonnen, gemaakt van gealuminiseerd Mylar. Hun gebruik was beperkt tot paren grondstations die allebei tegelijk de ballonnen konden waarnemen. Hiermee toonde de NASA aan dat een kunstmaan kon worden gebruikt voor de reflectie van radiogolven die door een grondstation waren opgestraald. Met dit systeem kon een telefoongesprek tot stand worden gebracht tussen de Oost -en de Westkust van de Verenigde Staten. Dit duurde slechts een zeer korte tijd (op het moment dat beide plaatsen vanuit de satelliet bestraald konden worden); bovendien maakte de Echo-1 gebruik van een zeer smalle frequentieband, zodat er slechts één telefoongesprek tegelijkertijd kon worden verzonden.

De eerste actieve communicatiesatelliet, de Telstar 1, werd in een lage baan gebracht. Dit was de eerste satelliet die door de industrie werd gebouwd en betaald. Men noemde hem "actief" omdat hij, in tegenstelling tot zijn voorgangers, was voorzien van versterkers waarmee het ontvangen signaal behandeld werd alvorens het terug te zenden naar de aarde. De Telstar (zie *Figuur 1.6*) was geconstrueerd in de laboratoria van de American Telephone and Telegraph



Company. Deze satelliet, waarmee de revolutie op het gebied van wereld-televisieverbindingen vanuit een lage baan om de aarde begon, woog 77 kg en had een middellijn van 88 cm. Telstar 1 werd gelanceerd op 10 juli 1962. De Telstars (men heeft er slechts twee gebouwd) werden gebruikt voor telecommunicatieproeven. De eerste videoverbinding tussen de Europese en Amerikaanse televisienetten werd door tussenkomst van de Telstar op 11 juli 1962 tot stand gebracht. De Telstar 1 kon 60 telefoongesprekken of één zwart/wit televisieprogramma overbrengen. De satelliet zat in een baan met een laagste punt van 955 km en een hoogste punt van 6238 km. Die baan werd eenmaal in de 157,8 minuten doorlopen en had een helling van  $44,79^\circ$  ten opzichte van de evenaar. De Telstar werkte tot 21 februari 1963.

Een ander Amerikaans bedrijf, RCA, had inmiddels een satelliet met een iets kleinere capaciteit dan Telstar voltooid. Deze satelliet, de Relay 1, werd op 13 december 1962 gelanceerd en is tot februari 1965 gebruikt. De Relay kon 24 telefoongesprekken of één televisieprogramma overbrengen. Deze satelliet was beter bestand tegen straling en om er mee te communiceren waren betrekkelijk kleine antennes al voldoende.

Op 26 juli 1963 kwam Syncom 2 in een synchrone baan boven de Atlantische oceaan. Syncom 1 was daar in februari al geplaatst maar diens radio werkt niet. De Syncom 2 had een hoogte van 39,4 cm en een middellijn van 77 cm. De baan van de Syncom 2 had een inclinatie van  $28^\circ$ . De satelliet had een zeer geringe capaciteit: één telefoongesprek.

### *1.5.2 Amerikaanse communicatiesatellieten*

#### 1.5.2.1 Oprichting COMSAT

Aan het begin van het ruimtevaarttijdperk vierde Rusland vooral triomfen door de primeur in de wacht te slepen, maar blijkbaar hebben de Verenigde Staten sneller dan de Russen het geweldige praktische nut van de communicatiesatellieten gezien.

Al op 31 augustus 1962 besloot het Amerikaanse Congres om een organisatie op te richten die de Amerikaanse belangen van de satellietcommunicatie zou verdedigen. Die organisatie "COMSAT" wordt gecontroleerd door de Amerikaanse Regering en begon officieel in juni 1964.

### 1.5.2.2 OSCARS voor de radio-amateurs

Om te beginnen zijn, en worden, er nog steeds af en toe kleine communicatiesatellieten gelanceerd voor het gebruik van radio-amateurs. Deze satellieten vliegen altijd als “gast” mee met andere kunstmanen die in een baan om de aarde worden gebracht. Ze worden aangeduid met de codenaam OSCAR.

De OSCAR-1 werd al op 12 december 1961 samen met de Discoverer-36 gelanceerd en zond gedurende 18 dagen signalen naar de aarde. De satelliet keerde op 31 januari 1962 in onze dampkring terug.

De OSCAR-2 (gewicht 6,8 kg) werd op 2 juni 1962 meegenomen. Ook deze satelliet werkte 18 dagen en verbrandde meteen daarna op 21 juni 1962 in de aardatmosfeer.

De OSCAR-3 werd op 9 maart 1965 gelanceerd en was gedurende 16 dagen werkzaam. Dit was de eerste actieve communicatiesatelliet voor radio-amateurs.

De OSCAR-4 werd op 21 december 1965 gelanceerd, samen met de LES-3 en de LES-4 (zie militaire communicatiesatellieten) en samen met één wetenschappelijke satelliet (in totaal werden er dus vier kunstmanen, gelijktijdig met behulp van één raket gelanceerd).

De OSCAR-5 werd op 23 januari 1970 samen met de weersatelliet ITOS-1 in een baan om de aarde gebracht. Deze OSCAR woog 17 kg en was gebouwd door een groep radio-amateurs op de Universiteit van Melbourne.

Het OSCAR-project is trouwens toch te beschouwen als een internationaal samenwerkingsproject, omdat de OSCAR-6 (gelanceerd op 15 oktober 1972 samen met de NOAA-2) was gebouwd door een groep radio-amateurs uit Australië, West -Duitsland en de Verenigde Staten.

Op 15 november 1974 werd de AMSAT/OSCAR-7 samen met de NOAA-4 en een Spaanse satelliet in een baan om de aarde gebracht. De AMSAT/OSCAR-8 werd op 5 maart 1978 samen met de Landsat-3 gelanceerd. Op 26 oktober 1978 lanceerde Rusland satellieten voor het gebruik van radio-amateurs: de Radio-1 en -2.

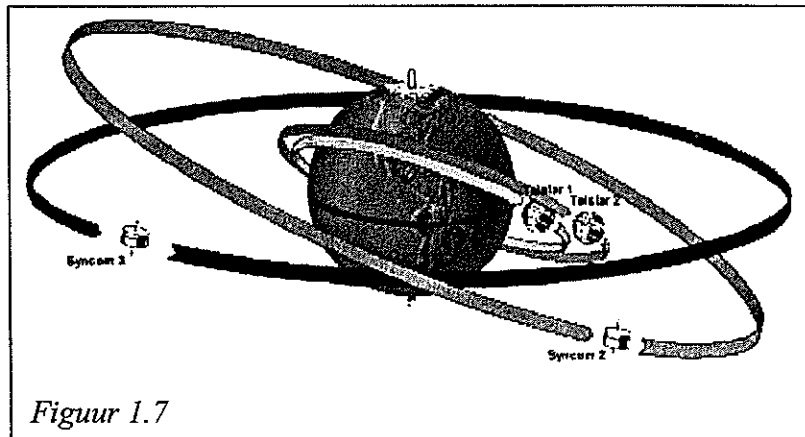
### 1.5.2.3 Andere communicatiesatellieten

Intussen kregen de projecten uit de begintijd in de Verenigde Staten een vervolg. De Telstar-2 werd op 7 mei 1963 met succes gelanceerd, en de Relay-2 op 21 januari 1964.

Deze 78 kg wegende satelliet toonde duidelijk aan dat communicatie via een satelliet in een lage baan om de aarde mogelijk was.

De 39 kg wegende Syncom 3 werd op 19 augustus 1964 gelanceerd. Met deze satelliet

werden microgolf-experimenten tussen Noord-Amerika en het Westelijk deel van de Stille Oceaan uitgevoerd. De satelliet had een grotere bandbreedte dan de Syncom 2, waardoor



*Figuur 1.7*

ook televisie-experimenten mogelijk waren. De Syncom 3 was met een inclinatie van  $0,0095^\circ$  vrijwel geostationair. (zie *Figuur 1.7*)

#### 1.5.2.4 Militaire communicatiesatellieten

Intussen had ook het Amerikaanse leger volop belangstelling voor de communicatiesatellieten gekregen. Hierover werd niet alles bekend gemaakt.

Bekend is wel dat de Amerikaanse luchtmacht op 11 februari 1965 een satelliet lanceerde om telecommunicatie te testen. Die satelliet heette de LES-1 (Lincoln Experimental Satellite). In de LES-reeks volgden LES-2 op 6 mei 1965 met als opgegeven doel het testen van technieken en onderdelen voor toekomstige communicatiesatellieten van de Amerikaanse luchtmacht. De LES-3 (verbrand op 6 april 1968) en LES-4 werden samen gelanceerd op 21 december 1965. De LES-5 werd samen met vijf andere militaire satellieten op 1 juli 1967 gelanceerd. De LES-6 volgde samen met drie wetenschappelijke satellieten op 26 december 1968. Op 15 maart 1966 werden de LES-8 en LES-9 gelanceerd met als hoofddoel: communicatie tussen deze twee satellieten onderling.

Op 16 juni 1966 werden zeven militaire communicatiesatellieten, samen met een wetenschappelijke satelliet, met behulp van één raket in een baan om de aarde gebracht. De satellieten wogen elk 45,3 kg en bevatten 8500 zonnecellen. Ze werden gedoopt tot IDCSP-1 t.e.m. -7, waarbij die afkorting staat voor Initial Defense Communication Satellite Program. Later zou deze naam worden omgedoopt tot IDSCS (Initial Defense Satellite Communication System). Een groot aantal satellieten met behulp van één (meestal Titan-3)

raket lanceren was troef in het militaire Amerikaanse programma. Op 18 januari 1967 werden de IDCSP-8 t.e.m. -15 gelanceerd, en op 1 juli 1967 de IDCSP-16, -17 en -18 (samen met de LES-5 en twee andere satellieten). De IDCSP-19 t.e.m. -26 volgden op 13 juni 1968, bij welke gelegenheid de nieuwe naam IDSCS werd ingevoerd.

De geschiedenis ging toen snel. Op 9 februari 1969 werd de militaire satelliet TACSAT-1, die 726 kg woog, gelanceerd. Slechts drie dagen daarvoor was de civiele Intelsat-3 F3 van 287 kg de ruimte ingegaan. Het verschil in gewicht kwam ook te voorschijn bij het verschil in capaciteit: de Intelsat-3 kon 1200 telefoonkanalen verzorgen, de TACSAT maar liefst 10000 tweewegskanalen! De naam "TACSAT" is afgeleid van TACTical communication SATellite.

Voor de lancering van de TACSAT-1 had de Amerikaanse luchtmacht nog een proef genomen. Op 14 juli 1966 werd de OVL-8 gelanceerd. De OV was een grote bol (met een middellijn van 914 cm en een gewicht van 10,43 kg) van aluminiumdraad, die als passief communicatiesysteem werd gebruikt.

#### 1.5.2.5 DSCS

Op 21 maart 1971 lanceerde de Amerikaanse luchtmacht het prototype voor een nieuwe communicatiesatelliet. Ongeveer een half jaar later werden de DSCS-1 en -2 gelanceerd (DSCS = Defense Satellite Communication System). Beide satellieten wogen 522 kg en hadden een capaciteit van 1300 circuits. Ze werden in een geosynchrone baan om de aarde gebracht.

Op 13 december 1973 volgden de DSCS-3 en -4 die ook in een geostationaire baan gebracht werden.

De lancering van een verbeterde versie van de DSCS (nummer 5 en 6) mislukte op 20 mei 1975. De twee satellieten bereikten hun baan niet en ze verbrandden één dag na de lancering in de aardatmosfeer. Op 12 mei 1977 werden de DSCS-2 nummer 7 en 8 gelanceerd. In 1978 vielen twee DSCS-satellieten uit. Het Amerikaanse leger besloot toen satellieten op commerciële basis te gaan huren.

### 1.5.2.6 De TIP-communicatiesatellieten

Ondertussen was een nieuw militair project gestart. De TIP-1 mislukte. De TIP-2 werd op 12 oktober 1975 en de TIP-3 op 1 september 1976 gelanceerd. Ook voor het leger werden communicatiesatellieten onmisbaar. Elke keer dat er ergens een oorlog uitbrak, werden er niet alleen veel verkenningsatellieten gelanceerd maar ook communicatiesatellieten. Op 9 februari 1978 werd een militaire telecommunicatiesatelliet, de FLTSATCOM, voor het gebruik van de Amerikaanse Marine gelanceerd.

### 1.5.2.7 De vreedzame ATS-satellieten

Op 7 december 1966 werd een nieuw type satelliet, de ATS-1 (Applications Technology Satellite), gelanceerd naar een geostationaire baan. De ATS was niet alleen een communicatiesatelliet, maar ook een weersatelliet.

De ATS-1 werd op 6 april 1967 gevolgd door de ATS-2 en op 5 november 1967 door de ATS-3. De lancering van de ATS-4 en de ATS-5 mislukte.

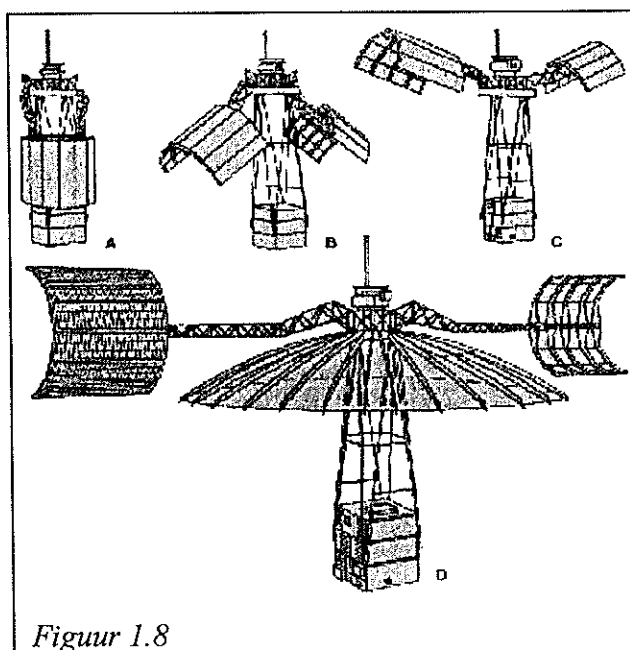
De ATS-6, die op 30 mei 1974 werd gelanceerd is een van de best geslaagde experimentele communicatiesatellieten ter wereld. Deze satelliet werd gebouwd in opdracht van het Goddard Space Flight Center van NASA door de Fairchild and Electronics Company. Nieuw aan de satelliet was dat in de ruimte een 9,1 m grote antenne werd ontvouwd, die op bepaalde gebieden van de aarde kon gericht worden. Deze satelliet had ook nog een krachtige TV-relaiszender.

A De lanceertoestand (zo ziet hij eruit als ze hem loskoppelen van de lanceerraket).

B De armen met zonnepanelen komen vrij en gaan uitschuiven.

C De zonnepanelen ontvouwen zich en de armen schuiven uit.

D De gehele ontvouwde toestand. De parabolische reflector "paraplu"-antenne is uitgeschoven tot zijn volle diameter van 9,1 m.



Figuur 1.8



De ATS-6 werd in een geostationaire baan gebracht waarin hij op commando over de evenaar bewoog. Aanvankelijk bevond de satelliet zich boven de Galapagos-eilanden, zodat de antenne op de Verenigde Staten kon gericht worden. Daarna is hij voor experimenten in India boven het Victoria-meer in Afrika gebracht en daarna weer in de richting van de Verenigde Staten gebracht.

Vooraf het experiment in India is bekend geworden. Gedurende een jaar werden hier televisie-uitzendingen verzorgd. De TV-uitzendingen werden gebruikt om voordrachten over landbouw, hygiëne en veiligheid te houden voor een bevolking zonder enige scholing. Het experiment werd aangeduid als SITE (Satellite Instructional Television Experiment). NASA leverde hierbij de satelliet en de Indische Regering zorgde voor de televisieprogramma's waarbij voor de ontvangst slechts een antenne van 3 m nodig was. De antenne werd gemaakt van kippengaas, ook had men nog een signaalomvormer nodig.

Uit onderzoeken bleek dat een groot deel van de Indische bevolking regelmatig naar de SITE-uitzendingen keek, die door de ATS-6 speciaal op India werden gericht. Toch is het door enkele Technici van de Technische Hogeschool in Delft gelukt om met een 4 m lange antenne dezelfde beelden te ontvangen.

Dit resultaat was van zeer groot belang. Het betekende dat het niet goed mogelijk was vanuit de ruimte "afgeschermd" naar een bepaald land toe televisie-uitzendingen te verzorgen. In een zeer verre omgeving van dat land zou men dezelfde beelden kunnen ontvangen. Dit heeft financiële en juridische gevolgen, zoals de commerciële televisie, die via een satelliet vanuit een ander land wordt verzorgd of het geval van een land dat geen (politieke) informatie via satelliet-televisie-uitzendingen aan anderen wil doorgeven.

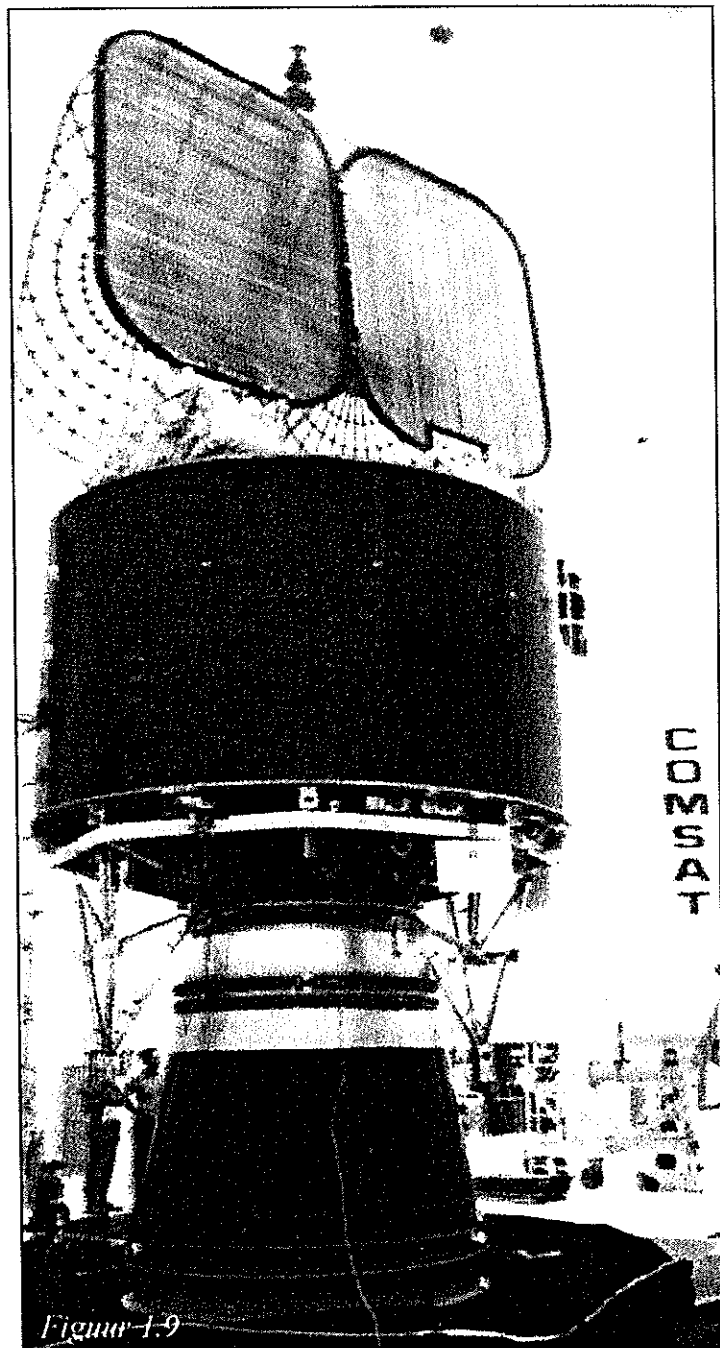
Boven de Verenigde Staten werd de ATS-6 nog gebruikt voor medische diagnoses over lange afstanden in Alaska en voor onderwijzerscongressen in het gebied van de Appalachen midden in de Verenigde Staten.

De ATS-6 was bedoeld om twee jaar te werken maar functioneerde van mei 1974 tot midden 1979, toen hij uit zijn geostationaire baan werd gehaald; omdat het geleidingssysteem niet meer werkte hadden de technici er geen vertrouwen meer in dat zij de ATS-6 op zijn plaats konden houden. De ATS-6 experimenten hebben in 1976 een vervolg gekregen met de lancering van de CTS (*zie bij 1.5.5: Canadese communicatiesatellieten*).

### 1.5.2.8 Weststar, Maristar, Comstar

Na alle experimenten en samenwerkingsprojecten was men toen in de Verenigde Staten begonnen met het lanceren van communicatiesatellieten voor intern gebruik. Van de Oostkust naar de Westkust, en over andere grotere afstanden, werden in de Verenigde Staten kunstmanen gebruikt voor het totstandbrengen van radio-, televisie-, telefoon- en telexverbindingen. De kunstmanen die hiervoor werden gebruikt, waren eigendom van Amerikaanse bedrijven (deze beheren ook het telefoonverkeer in dat land).

De eerste "binnenlandse" kunstmaan werd op 13 april 1974 gelanceerd. De 572 kg wegende Westar-1 werd in een geostationaire baan op 99° Westerlengte boven de evenaar gebracht. De capaciteit van de Westar-1 was 12 kleurentelevisiekanalen of 14 400



*Figuur 1-9*

telefoonkanalen. Deze satelliet van de telegraafmaatschappij Western Union werd door vijf grondstations (New York, Atlanta, Chicago, Dallas en Los Angeles) gevolgd. Op 10 oktober 1974 werd een tweede Westar gelanceerd, die boven de evenaar ten zuiden van Los Angeles werd gestationeerd, en op 10 augustus 1979 volgde Westar-3.

Op 13 december 1975 lanceerde NASA voor RCA de Satcom-1. De capaciteit van deze binnenlandse communicatiesatelliet was 24 x 1200 geluidskanalen of 24 televisiekanalen.

Op 26 maart 1976 werd een identieke Satcom-2 gelanceerd. De Satcom-3 werd op 7 december 1979 gelanceerd, maar raakte in een baan om de aarde zoek.

Voor de communicatie op zee (met schepen en booreilenden) werden voor Amerikaans gebruik in zeer korte tijd drie "Marisats" gelanceerd. De eerste Marisat op 19 februari 1976, de tweede 10 juni 1976 en de derde 14 oktober 1976. Opdrachtgever voor Marisats was de reeds genoemde Comsat. De Marisats wogen elk 327 kg en ze zijn in een geostationaire baan gebracht. De capaciteit van elke Marisat is 44 duplex teleprinterkanalen plus één tweewegs geluidskanaal.

De Comstar-1 (zie *Figuur 1.9*), werd gelanceerd op 13 mei 1976 en de Comstar-2 op 22 juli 1976. Beide geostationaire communicatiesatellieten zijn voor COMSAT gebouwd en gelanceerd. Op 29 juni 1978 werd de derde en laatste Comstar met succes gelanceerd. In tegenstelling tot de Intelsats (zie 1.5.4) zijn de Comstars voor intern gebruik van de Verenigde Staten. Hun capaciteit is 14 000 telefoonkanalen. De binnenlandse Comstar-satellieten, die zeven jaar operationeel moeten blijven, ontvangen, versterken en verzenden telefoongesprekken en TV-programma's. Dit tussen de grondstations in de Verenigde Staten en in Puerto Rico.

#### 1.5.2.9 Verenigde Staten

In 2003 (2005) wordt een speciale communicatiesatelliet in een baan om Mars geparkeerd en een robotwagentje op de planeet zelf afgeleverd om op verschillende plaatsen bodemmonsters te verzamelen. Het hoogtepunt van al die inspanningen komt dan twee jaar later als een maanwagentje een van die hoopjes bodemmonsters aan boord neemt, overlaadt in een capsule, die na koppeling met het wachtende moederschip ten slotte naar de aarde moet vliegen.

### **1.5.3 Russische communicatiesatellieten**

#### 1.5.3.1 Molnya-vluchten

De eerste Russische communicatiesatelliet werd op 23 april 1965 gelanceerd, 17 dagen na de eerste Intelsat-lancering. Deze Molnya-1 was de eerste van een lange reeks lanceringen die regelmatig zouden worden uitgevoerd. Opmerkelijk is dat de lanceringen van satellieten

van dit type niet werden stopgezet, toen een verbeterde versie (de Molnya-2) beschikbaar kwam.

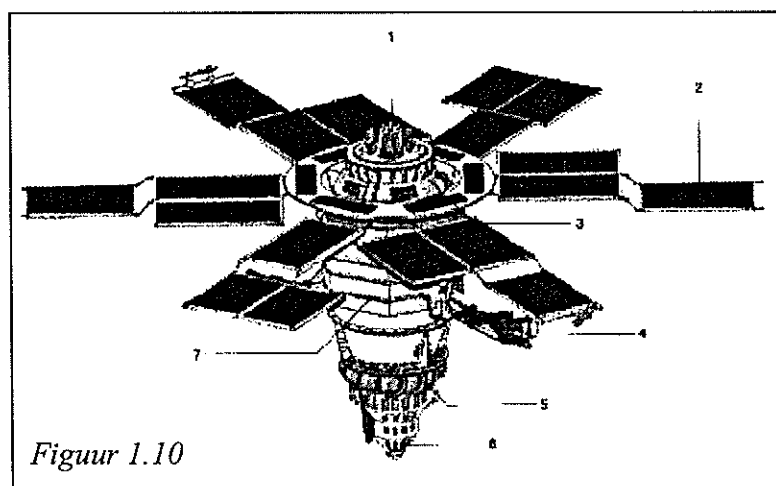
In tegenstelling tot de meeste Amerikaanse communicatiesatellieten werden de Molnya's niet in een geostationaire baan, maar in een langgerekte elliptische baan gebracht. Deze baan was zo gekozen dat de satellieten snel over vreemde landen bewogen, maar langzaam over de Sovjet-Unie.

Rusland heeft nooit de beschikking gehad over een net van straalzenders en kabelverbindingen, dat het gehele land omvatte. De satellieten vormden voor Rusland een relatief goedkope oplossing van het communicatieprobleem. De Molnya's vormden samen het Orbita-netwerk, het interne Russische communicatienetwerk voor radio, telefoon, telex en televisieverbindingen. In 1977 bevatte het netwerk al 74 grondstations.

De Molnya-satellieten hadden een grote sociale, politieke en economische invloed op de ontwikkeling van de Sovjet-staat, omdat zij mensen in afgelegen gebieden (met dikwijls verschillende culturen en gebruiken) in nauwer contact brachten met Moskou.

Alle satellieten van het type Molnya-1 wogen 1000 kg en bevatten zes zonnepanelen. Het vermogen van de zender op de Molnya-1 is 40 W.

- 1 Sensoren van het standregelingssysteem
- 2 Zonnepanelen
- 3 Drie ontvangers en zenders
- 4 Antennes
- 5 Hydrazine- en drukflessen
- 6 Baancorectiemotoren
- 7 Radiatoren



Op het gebied van de telecommunicatie is de samenwerking tussen Frankrijk en Rusland zeer hecht geweest. Op 30 november 1965 werd de eerste directe televisie-uitzending van Moskou naar Parijs via een Molnya gerealiseerd. Op 28 mei 1966 werd in omgekeerde richting (van Parijs naar Moskou) een rechtstreekse televisieverbinding tot stand gebracht. De 3<sup>de</sup> Molnya-1 is speciaal gebruikt voor experimenten met het Frans-Russische Secam-III televisiesysteem. Vele Molnya's maken ook foto's van de aarde. Ze hebben blijkbaar ook een functie als weersatelliet.

Op 4 april 1972 werd bij de lancering van de 20<sup>ste</sup> Molnya-1 de Franse satelliet Sret-1 meegevoerd. Deze 15 kg wegende kunstmaan is gebruikt om verschillende soorten zonnecellen te beproeven. De Sret-2 werd meegevoerd met de 30<sup>ste</sup> Molnya-1. Deze satelliet werd gebruikt voor het testen van materialen voor koeling en isolatie in de ruimte. De details, vooral de verschillen tussen de Molnya-serie zijn niet bekend gemaakt. Wel weten wij dat de Molnya-2 in een soortgelijke baan als de Molnya-1 werd gebracht. We weten ook dat het gewicht bij de Molnya-2 was opgelopen tot 1250 kg en bij de Molnya-3 tot 1500 kg. De Molnya-2 (1971) en de Molnya-3 (1974) verschilden ook van hun voorgangers doordat zij signalen met hogere frequenties in de centimeterband, van 4 GHz tot 6 GHz, konden verwerken. Met deze satellieten werken de Orbita-grondstations, die elk een schaalantenne met een diameter van 12 m hebben op een draaibaar onderstel. Deze antenne met lage ruis wordt op de satelliet gericht door middel van een elektrisch volgsysteem.

#### 1.5.3.2 Russische geostationaire satellieten

De eerste geostationaire communicatiesatelliet in de Molnya-reeks werd gelanceerd op 29 juli 1974. De tweede satelliet werd de Raduga-1 genoemd. Deze 5000 kg wegende satelliet werd op 22 december 1975 in een geostationaire baan gebracht. Ook de Raduga werd aan het Orbita-netwerk gekoppeld.

Op 11 september 1976 volgde de eveneens geostationaire Raduga-2, op 26 oktober 1976 de Ecran, op 24 juli 1977 de Raduga-3, op 19 juli 1978 de Raduga-4, op 21 februari 1979 de Ecran-3, op 24 april 1979 de Raduga-5 en op 3 oktober 1979 de Ecran-4.

De Ecran heeft als specifieke taak om TV-programma's uit de centrale studio's in Moskou door te zenden naar plaatsen met eenvoudiger grondstations (dit noemt men het Ecran-systeem). Dit kan omdat de Ecran-zenders een vermogen hebben dat enige malen groter is dan dat van andere communicatiesatellieten, en de ingebouwde antennes met zeer fijne bundels het mogelijk maken om TV-beelden direct naar de huiskamer te brengen via gemeenschappelijke antennes of rechtstreeks via een antenne op het dak.

Speciale faciliteiten voor het relayeren van de Olympische Spelen in Moskou in 1980 via de ruimte moesten 2 à 2,5 miljard kijkers op de hele wereld zo dicht mogelijk bij dit sportgebeuren brengen. Hiertoe behoorden nieuwe geostationaire satellieten van het

Gorizont-type met verbeterde relayeringsapparatuur met een groot aantal kanalen. Op 5 juli 1979 werd de Gorizont-1 en op 28 december 1979 werd de Gorizont-2 gelanceerd.

1 Uitschuifbare stang

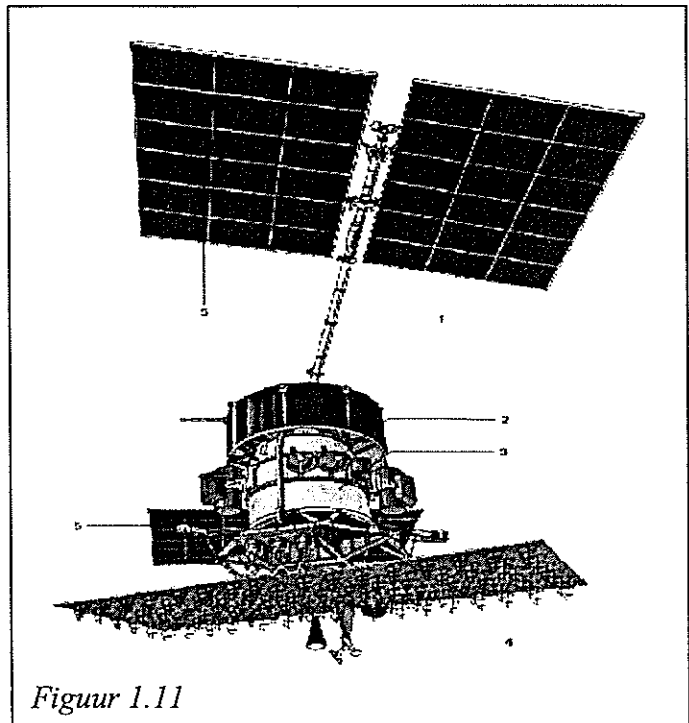
2 Stabilisator om de drie assen

3 Krachtige zender

4 Potlood-antennes waarmee TV-beelden kunnen worden gezonden naar TV-toestellen in huizen via een gemeenschappelijke grondantenne.

5 Zonnepanelen die in totaal twee kW vermogen leveren.

**Frequenties:** naar boven 6000 MHz, naar beneden 702-726 MHz



#### 1.5.4 Intelsat satellieten

##### 1.5.4.1 Oprichting van Intelsat

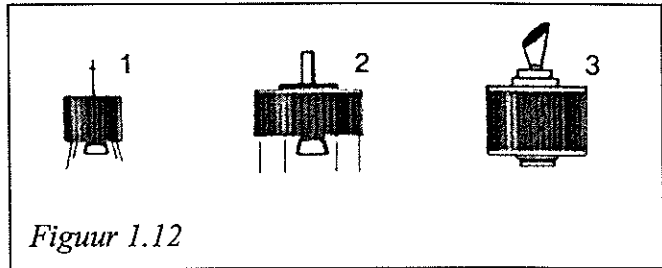
Op 20 augustus 1964 werd een internationale organisatie "Intelsat" opgericht. Het woord Intelsat staat voor "Internationale Telecommunicatie Satelliet Organisatie". Deze organisatie had als doel mogelijkheden te scheppen op het gebied van de telecommunicatie via satellieten. De Amerikaanse belangen in Intelsat werden verzorgd door COMSAT.

De groei van het aantal transatlantische circuits heeft ook gezorgd voor een prijsdaling. Zo is een transatlantisch telefoongesprek thans 55% goedkoper dan toen de Early Bird werd gelanceerd (6 april 1965). Ook zijn de kosten van één uur telefoonverbinding tussen New York en Parijs zelfs met 80% gedaald.

##### 1.5.4.2 De lancering van de Early Bird

De geschiedenis begint op 6 april 1965 met de lancering van de legendarische Early Bird. Deze Intelsat-1 (*Figuur 1.12 1*) had een capaciteit van 240 tweewegsgeluidskanalen. Deze

geostationaire satelliet was een cilinder, 72 cm breed en 59 cm hoog, en had in zijn baan een massa van 39 kg. Via deze satelliet was een eerste permanente verbinding tussen Europa



Figuur 1.12

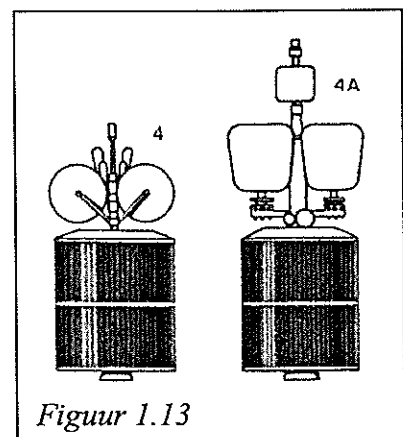
en Noord-Amerika gerealiseerd. De satelliet lijkt op de Syncom (die is ook in een geostationaire baan gebracht), niet alleen wat de baan, maar ook wat de bouw betreft. Beide satellieten werden dan ook in de Hughes-fabrieken gebouwd. De Early Bird werd op 28 juni 1965 voor commercieel gebruik vrijgegeven. De satelliet bleef operationeel tot januari 1969, toen nieuwe generaties Intelsats het werk hadden overgenomen. Van 29 juni 1969 tot 13 augustus 1969 werd de Early Bird opnieuw ingeschakeld. In die periode was er, in verband met de eerste bemande landing op de maan, extra veel vraag naar circuits.

#### 1.5.4.3 De volgende Intelsat-satellieten

Het succes van de "Early Bird" was reden genoeg en zo werd op 27 oktober 1966 de Intelsat-2 gelanceerd (Figuur 1.12 2). De capaciteit van deze satelliet was even groot als de Early Bird. De drie satellieten die met succes in die serie werden gelanceerd, bevinden zich nog wel in de ruimte, maar worden niet meer gebruikt.

Met de eerste Intelsat-3 (Figuur 1.12 3) die in 1968 in haar baan werd gebracht beschikten de Amerikanen over een satellietcapaciteit van 1200 tweewegstelefoonkanalen of vier televisiekanalen per satelliet. Ook deze serie wordt niet meer gebruikt.

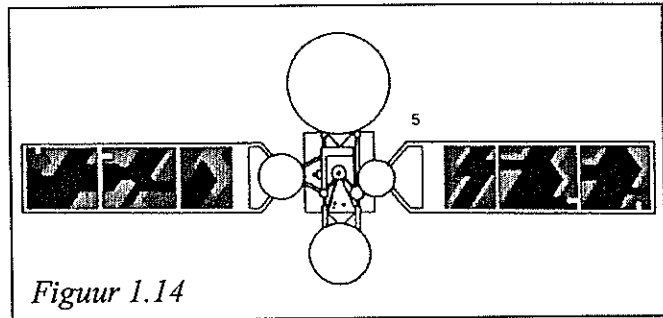
Het Intelsat-4 tijdperk begon op 25 januari 1971 (Figuur 1.13 4). Deze satellieten konden al 9000 tweewegstelefoonkanalen overbrengen. In totaal zijn er daar acht van geweest. De satellieten van dit type wegen 730 kg. Hun opvolger weegt al het dubbele. De Intelsat-4A (Figuur 1.13 4A) heeft namelijk een gewicht van 1500 kg en



Figuur 1.13

een capaciteit van 6250 tweewegstelefooncircuits plus twee kleurentelevisiekanalen. De lanceringen werden via COMSAT uitgevoerd door NASA.

In 1980 werd de eerste van de Intelsat-5 satellieten gelanceerd. De Intelsat-5 heeft 12 000 telefoonlijnen plus twee kleurentelevisie-kanalen (*Figuur 1.14*). Deze Intelsat-5 satellieten werden gebouwd door een groep bedrijven onder leiding van de Amerikaanse Ford-fabrieken.



*Figuur 1.14*

### *1.5.5 Andere landen*

Steeds meer landen gaan beseffen dat communicatiesatellieten economisch mogelijk zijn. Een probleem dat vele landen hebben, is dat ze wel satellieten kunnen bouwen of laten bouwen, maar dat ze voor de lancering op de hulp moeten rekenen van de Verenigde Staten of Rusland. Juist daarom zijn ze in der tijd in Europa begonnen met het bouwen van een raket die satellieten in een geostationaire baan kan brengen.

#### 1.5.5.1 Lanceringen van militaire communicatiesatellieten

Vooraf militairen hebben zich met groot enthousiasme op de communicatiesatellieten geworpen. Op 22 november 1969 werd de Skynet-A door NASA gelanceerd voor de Engelse Regering. Deze 129 kg wegende satelliet werd in een geostationaire baan op 45° Oosterlengte gebracht.

Op 19 augustus 1970 volgde de Skynet-B, maar deze satelliet kwam niet in de gewenste baan. Ook met de Skynet-2-A ging het mis: de satelliet werd op 19 januari 1974 gelanceerd en verbrandde op 25 januari 1975 zonder zijn geostationaire baan te hebben bereikt.

Op 23 november 1975 had NASA meer succes: de Skynet-2-B werd die dag in de door de Engelse Regering gewenste geostationaire baan gebracht.

Ook de NATO beschikt over een eigen communicatiesatellietennetwerk. De NATO-1 werd op 20 maart 1970 door NASA in een geostationaire baan op 18° Westerlengte gebracht. De NATO-2 volgde op 3 februari 1971, de 720 kg wegende NATO-3A op 22 april 1976, de NATO-3B op 28 januari 1977 en de NATO-3C op 19 november 1978. De satellieten van het type NATO-3 wegen 720 kg.



### 1.5.5.2 Canadese communicatiesatellieten

Canada was het eerste land in de wereld dat niet zelf over raketten beschikte en toch een stelsel communicatiesatellieten voor intern gebruik in de ruimte wist te krijgen.

Op 10 november 1972 werd de Anik-1 gelanceerd (met een Amerikaanse raket) naar een geostationaire baan op 104° Westlengte. Anik is een Eskimo-woord dat “broeder” betekent. Met de Anik's werd communicatie via radio, telefoon en televisie mogelijk. De 270 kg wegende Anik-1 heeft een capaciteit van 10 kleurentelevisiekanalen of 9 600 telefoonicuits.

De Anik-2 met hetzelfde vermogen, eveneens bestemd voor intern gebruik, werd op 20 april 1973 op 109° Westlengte boven de evenaar geplaatst.

Op 7 mei 1975 werd met de Anik-3 de capaciteit van het interne satellietnet voor Canada verder uitgebreid.

Canada had de smaak te pakken en ging samen met de Verenigde Staten (en met een kleine bijdrage van Europa) over tot de bouw en lancering van een nieuwe experimentele telecommunicatiesatelliet de CTS.

In de Verenigde Staten werden ook proeven gedaan met een mobiel eindstation. In een autobus is het ontvangstation gebouwd, waarmee rechtstreeks van de satelliet beelden kunnen worden ontvangen. De antenne die nodig was voor die ontvangst, heeft een middellijn van 1 meter.

### 1.5.5.3 Samenwerking van Frankrijk en West-Duitsland

Frankrijk en West-Duitsland lanceerden samen twee experimentele telecommunicatiesatellieten, de Symphonie-1 en -2 op respectievelijk 19 december 1974 en 27 augustus 1975, naar een geostationaire baan. Deze satellieten wogen bij de lancering 402 kg en in de baan 230 kg. Het verschil in gewicht is de brandstof gebruikt om de beoogde baan te bereiken.

De Symphonie-1 en -2 zijn door NASA gelanceerd met behulp van een Thor-Delta 2914 raket. Vele experimenten met de Symphonie-satellieten worden in West-Duitsland en in Frankrijk uitgevoerd. Er zijn echter ook Afrikaanse staten die de Symphonie-satellieten gebruiken, en sedert 1978 zelfs China.

#### 1.5.5.4 Indonesische communicatiesatellieten

De Hughes-fabrieken bouwden in opdracht van de Indonesische Regering twee satellieten voor communicatie tussen de Indonesische eilanden: de Palapa-1 en -2. Deze satellieten werden door NASA gelanceerd respectievelijk in juli 1976 en op 10 maart 1977. Beide, 575 kg wegende, satellieten werden in een geostationaire baan gebracht. De satellieten bevatten elk 12 transponders, één transponder is goed voor 1 kleurentelevisiekanaal of 4 000 geluidskanalen.

Met de Palapa's werden vele van de 13 000 Indonesische eilanden bereikt. Het aantal wordt geleidelijk opgevoerd tot alle 130 miljoen Indonesiërs radio en televisie kunnen ontvangen, en telefoongesprekken via een satelliet kunnen voeren. De Palapa-2 is vergelijkbaar met de Anik en de Westar.

#### 1.5.5.5 Japan

De eerste Japanse communicatiesatelliet CS werd op 12 december 1977 gelanceerd. Deze lancering werd door NASA uitgevoerd. Japan lanceerde in 1978 de eerste echte televisiesatelliet BSE.

#### 1.5.5.6 China

Kan de komende jaren voor verrassingen zorgen in de bemande ruimtevaart. Voor het overige gaan de Chinezen voortdurend door met wat ze al doen sinds de lancering (24 april '70) van hun eerste satelliet met een eigen "Lange-Marsraket". De Chinezen zullen actief zijn op de winstgevende internationale lanceringsmarkt, ze realiseren microzwaartekrachtexperimenten in de ruimte, bouwen communicatie- en aardobservatiesatellieten.

#### 1.5.5.7 Duitsland

Sinds de lancering van zijn eerste satelliet, de Azur ('69), en de zonnepsondes Helios-1 en -2 (in '75 en '76) is Duitsland op tal van ruimtevaartterreinen actief. Daarnaast worden er enkele microsattelietprogramma's gerealiseerd: Safir en de voor Italië gebouwde Temisat

voor informatieoverdracht, Tubsat en Bremsat voor onder andere communicatie-experimenten. Wat de lanceringen betreft richt Duitsland zich vooral op het gebruik van (goedkope) Russische raketten.

#### 1.5.5.8 ESA (European Space Agency)

Deze veertien landen omvattende Europese ruimtevaartorganisatie is min of meer vergelijkbaar met de Amerikaanse NASA en houdt zich bezig met alle terreinen van ruimtevaart en ruimteonderzoek.

Een project van ESA dat gebruik maakt van een nieuwe communicatietechnologie is de Artemis.

#### 1.5.5.9 Frankrijk

De Franse ruimtevaartorganisatie CNES is in Europa de drijvende kracht achter de vanuit Kourou (Frans-Guyana) te lanceren Europese Ariane-raketten. Daarnaast bouwen de Fransen veel communicatiesatellieten voor andere landen. Ook Frankrijk werpt zich nu op de snelle productie van betrekkelijk goedkope minisatellieten, zowel voor eigen gebruik als voor anderen (eerste lancering in 1999).

#### 1.5.5.10 Israël

De Israëliërs verbijsterden hun buurlanden toen ze op 19 september 1988 met een eigen Shavit-draagraket vanaf de basis Palmachin hun Offeq-1 (156 kg) in een baan om de aarde brachten. Offeq-2 en -3 volgden in resp. '90 en '95. De 55 kilo wegende minisat Gurwin was aan boord bij de eerste vlucht van de Russische Startraket en ging verloren toen die lancering mislukte (28 maart '95). Verder heeft Israel de eigen Amos-communicatiesatelliet ontwikkeld, die op 15 mei '96 met een Ariane-4-raket werd gelanceerd.

#### 1.5.5.11 Spanje

In Spanje wordt serieus gedacht over de ontwikkeling van een eigen raketsysteem voor de lancering van lichte satellieten. De eerste lancering van de Spaanse Capricornio-raket vanaf

de Canarische Eilanden met in de neus de voornamelijk voor communicatiedoeleinden bedoelde minikunstmanen Nanosat en Venus, zou omstreeks de eeuwwisseling kunnen plaatshebben. Voordien gaat er nog een satellietje de ruimte in als extraatje bij een Arianelancering.

## HOOFDSTUK 2: TECHNIEK VAN DE

## SATELLIETCOMMUNICATIE

### 2.1 Coördinaten van een satelliet

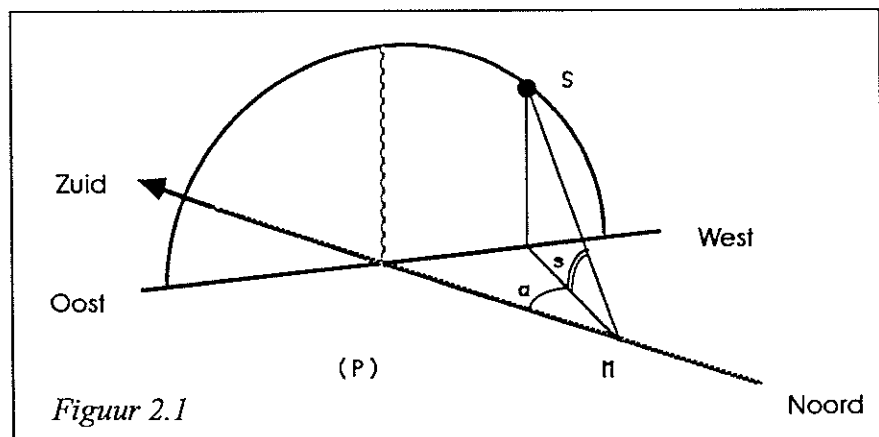
Om een satelliet ontvangst- of verzendinrichting te kunnen installeren, moeten we de positie kennen van de satelliet op de geostationaire baan, d.w.z. de coördinaten van de satellieten waarvan of waarnaar we de signalen willen ontvangen of verzenden.

#### 2.1.1 Azimut - en elevatiehoek

In het vlak waar station M zich bevindt (het plaatselijk horizontaal vlak P) wordt de positie van een satelliet (S) op de equatoriale baan volledig bepaald door twee hoeken:

- de azimut hoek  $a$
- de elevatiehoek  $s$

De azimut hoek (zie *Figuur 2.1*) is de hoek tussen de richting van de satelliet en een verticaal vlak, loodrecht op de aarde, dat door de noord - zuid - as heen loopt. In



theorie kan de azimuthhoek over  $180^\circ$  draaien; in werkelijkheid is een variatie van ongeveer  $150^\circ$  mogelijk: dit komt overeen met de satellieten die zeer dicht tegen de horizon aan staan, en waarvan de uitzendingen nog met een aanvaardbare kwaliteit opgevangen kunnen worden, d.w.z. zonder al te veel grondruis. Met de noord - zuid - as als referentiepunt, varieert de azimuthhoek van  $75^\circ$  west tot  $75^\circ$  oost.

De elevatiehoek (zie *Figuur 2.1*) is de hoek tussen de aarde en de lijn SM (de as van de parabool). Hij is een maat voor de hoogte van de satelliet t.o.v. de plaatselijke horizon. De

elevatiehoek is het grootste, wanneer de satelliet zich pal zuid bevindt; theoretisch is zijn kleinste waarde gelijk aan nul, wat overeenkomt met een azimut-positie pal west of pal oost. In de praktijk is het aanvaardbare minimum circa  $10^\circ$  boven de horizon in westelijke of oostelijke richting.

De azimut- en elevatiehoeken, nodig om de zend- of ontvangstantenne goed te richten, hangen af van de geografische positie van het zend- of ontvangststation.

### 2.1.2 Geometrische gegevens

De azimut- en elevatiehoek kan worden berekend in functie van de breedtegraad  $i$  van het station, en van het verschil  $L$  tussen de lengtegraad van de satelliet en die van het station  $M$ . De figuur toont de hele geometrie van de verbinding tussen de satelliet  $S$  en het grondstation  $M$ . Hierin worden de volgende grootheden bepaald:

- $a = (M'M, MM'')$ : azimuthoek
- $s = (M''M, MS)$ : elevatiehoek
- vlak  $P$  doorheen de punten  $M, M', M''$ : bij station  $M$  behorend horizontaal vlak, loodrecht op het plaatselijke verticale vlak  $OM$  en loodrecht op het meridionale vlak van het station,  $OMM'$ .
- vlak doorheen de as  $OG$  en de noord - zuid as: nulmeridiaan van Greenwich.
- $v = (OM, OS)$
- $R$  = straal van de aardbol
- $d = SM$ : afstand tussen satelliet en ontvangststation
- $D = SS'$ : hoogte van de satelliet

In de rechthoekige driehoeken  $OMM''$ ,  $OMM'$  en  $OM'M''$  geldt:

$$- OM' \cdot \cos i = R \quad (2.1)$$

$$- OM'' \cdot \cos L = OM' \quad (2.2)$$

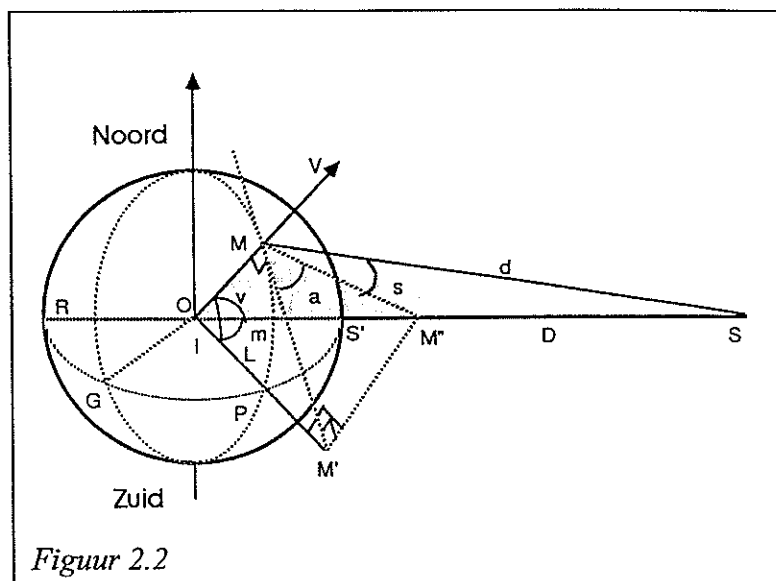
$$- OM'' \cdot \cos v = R \quad (2.3)$$

Uit deze drie vergelijkingen  
leiden we af:

$$R / \cos v = R / (\cos i \cdot \cos L)$$

En daaruit:

$$\cos v = \cos i \cos L \quad (2.4)$$



Anderzijds geldt in de rechthoekige driehoek OM'M':

$$M'M'' = OM' \cdot \text{tg } L$$

Rekening houdend met (2.3) en (2.2) kunnen we dus schrijven:

$$M'M'' = MM' \cdot \text{tg } a$$

$$MM' = R \cdot \text{tg } i$$

Uit deze twee vergelijkingen en de voorgaande, leiden we af dat:

$$\text{tg } a = \sin L / (\cos v \cdot \text{tg } i)$$

Wanneer we  $\cos v$  door (2.4) vervangen, wordt dit:

$$\text{tg } a = \text{tg } L / \sin i$$

Wat uiteindelijk de vergelijking voor de azimuthhoek oplevert:

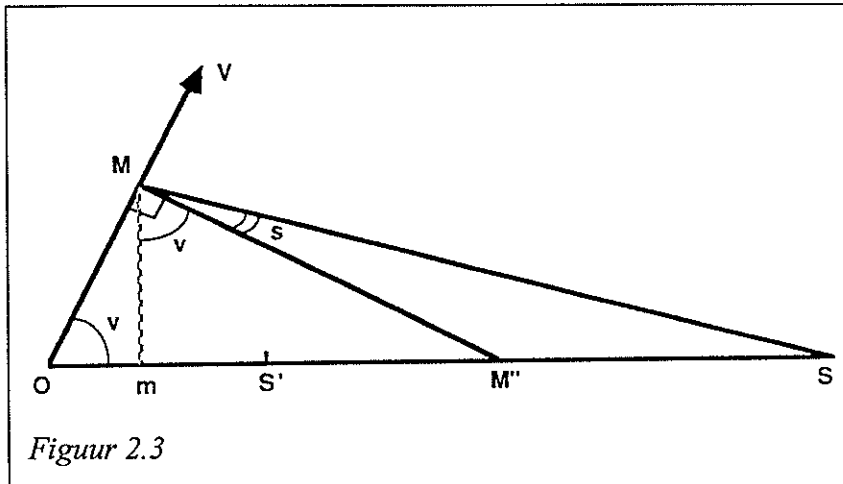
$$a = \text{Bgtg } (\text{tg } L / \sin i)$$

Nu gaan we de elevatiehoek  $s$  berekenen. Gegeven:  $m$  is de projectie van  $M$  op  $OSM$  in het vlak  $OMS$  (zie Figuur 2.3). Het is duidelijk dat de hoek  $(mM,MS) = (v + s)$ ; daarom geldt:

$$\text{tg } (v + s) = Sm/Mm$$

Ofwel:

$$\text{tg } (v + s) = [(D + R) - R \cos v] / (R \sin v)$$



Wanneer we hierin de tangens uitdrukken in de vorm:

$$\operatorname{tg}(v + s) = (\operatorname{tg} v + \operatorname{tg} s) / (1 - \operatorname{tg} v \cdot \operatorname{tg} s)$$

Dan wordt dit:

$$\operatorname{tg} v + \operatorname{tg} s = [(D + R) / R - \cos v] \cdot [(1 - \operatorname{tg} v \cdot \operatorname{tg} s) / \sin v]$$

Door vereenvoudiging en herschikking van de termen kan men dit herleiden tot:

$$\operatorname{tg} s = [\cos v - R / (D + R)] / \sin v$$

Wanneer we de vergelijking (2.4) gebruiken, levert dit op:

$$s = \operatorname{Bgtg} \left[ \frac{\cos i \cdot \cos L \cdot R}{D + R} / \sqrt{1 - \cos^2 i \cdot \cos^2 L} \right]$$

In de praktijk zullen we gewoon de waarden invullen in de formule voor de azimuth – en elevatiehoek.

## 2.2 De Microgolven

Microgolven kunnen geconcentreerd worden in krachtige, zeer goed richtbare stralen, die, omdat ze gemakkelijk door de aardatmosfeer dringen, op grote schaal gebruikt worden voor satellietcommunicatie. Radiogolven zijn over het algemeen ongeschikt voor deze toepassing omdat ze meestal gereflecteerd worden door de ionosfeer.

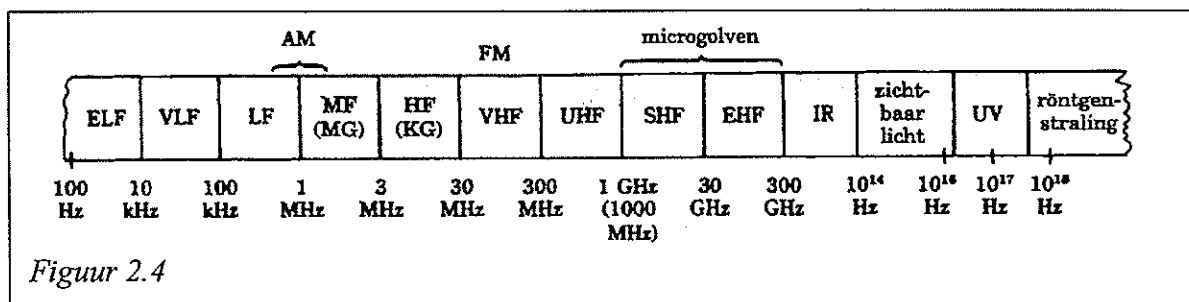
We zullen nu zeer kort deze microgolven bespreken.



## 2.2.1 Het elektromagnetisch spectrum

Wanneer een hoogfrequent elektrisch signaal wordt afgestraald ontstaat een elektromagnetische golf. Het elektromagnetische spectrum omvat echter niet alleen radiogolven, maar ook infrarood, zichtbaar en ultraviolet licht, röntgen- en gammastraling en andere componenten.

Het elektromagnetisch spectrum is voor de overzichtelijkheid opgesplitst in een aantal banden. Het begint met de allerlaagste wisselstroomfrequenties, en loopt via het zichtbare licht door tot de röntgen- en gammastraling. Het gebied van de extreem lage frequenties (ELF) omvat onder andere de lichtnetfrequenties en andere lage frequenties in het bereik van 25 tot 100 Hz. De marine gebruikt deze frequenties voor de communicatie met onderzeeboten.



Het gebied van de zeer lage frequenties (VLF) begint net boven het ELF-gebied, hoewel de meeste deskundigen de term reserveren voor frequenties van 10 tot 100 kHz. Het gebied van de lage frequenties (LF) loopt van 100 tot 1000 kHz. Het middengolfg gebied (MW) loopt van 1 tot 3 MHz. De AM-omroepband (amplitudemodulatie, van 540 tot 1630 kHz) beslaat delen van de LF- en MF-band.

Het HF-gebied (hoogfrequent), ook bekend onder de naam kortegolfg banden (SW) loopt van 3 tot 30 MHz. De VHF-band (Very High Frequency) begint bij 30 MHz en loopt door tot 300 MHz, en omvat onder andere de FM-omroepband (frequentiemodulatie), openbare diensten, een aantal televisiestations, luchtvaart- en zendamateurbanden. De UHF-band (Ultra High Frequency) strekt zich uit van 300 MHz tot 900 MHz. Voor deze band geldt grotendeels hetzelfde als hierboven opgemerkt voor de VHF-band. Het microgolfg gebied begint net boven de UHF-band, bij 900 of 1000 MHz, afhankelijk van welke deskundige men raadpleegt.

### 2.2.2 *Specifieke eigenschappen van micrigolven*

Waarin verschillen microgolven nu eigenlijk van andere elektromagnetische golven ? Microgolven nemen binnen het vakgebied van de HF-techniek een aparte plaats in omdat bij deze frequenties de golflengte ongeveer gelijk is aan de afmetingen van de elektronische componenten. Deze gedragen zich daarom bij frequenties in het microgolfg gebied anders dan bij andere frequenties. Een gewone 0,5 W metaalfilmweerstand gedraagt zich bij microgolffrequenties als een complex RLC-netwerk met verdeelde L- en C-waarden en een verrassend afwijkende R-waarde. Deze uiterst kleine verdeelde componenten zijn van groot belang bij microgolffrequenties terwijl ze bij lagere frequenties verwaarloosd kunnen worden.

### 2.2.3 *Golflengte en frequentie*

Voor alle golfvormen geldt dat snelheid, golflengte en frequentie met elkaar samenhangen, en wel zo dat het product van frequentie en golflengte gelijk is aan de voortplantingssnelheid. Voor microgolven kan dit verband als volgt in een formule worden gegoten:

$$\lambda \cdot f \cdot \sqrt{\epsilon} = c$$

hierin is:

$\lambda$  = golflengte in m

f = frequentie in Hz

$\epsilon$  = diëlektrische constante van het medium

c = lichtsnelheid (300 000 000 m/s)

De diëlektrische constante is een eigenschap van het medium waar de golf zich doorheen voortplant. De waarde van  $\epsilon$  is gedefinieerd als 1 in absoluut vacuüm, en is vrijwel gelijk aan 1,0 in droge lucht (1,006). In de dagelijkse praktijk kan de waarde van  $\epsilon$  in droge lucht gelijk aan 1,000 worden gesteld. In andere media dan lucht of vacuüm is de lichtsnelheid lager en is de waarde van  $\epsilon$  hoger dan de waarde in vacuüm. Teflon kan bijvoorbeeld gefabriceerd worden met waarden voor  $\epsilon$  van ongeveer 2 tot 11

### 2.2.4 De microgolfbanden

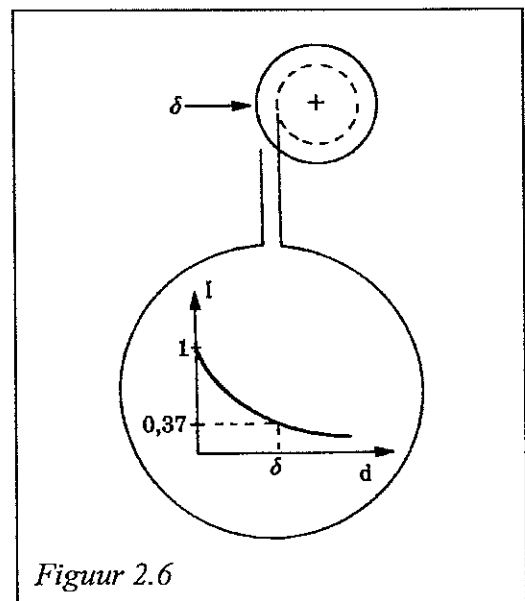
Tijdens de tweede wereldoorlog begon het Amerikaanse leger microgolven te gebruiken voor radar en andere toepassingen. Uit veiligheidsoverwegingen werden letters gebruikt om de verschillende banden in het microgolf-bereik aan te duiden. Omdat deze aanduidingen alom ingeburgerd raakten, worden ze in de industrie en het leger nog steeds gebruikt. Jammer genoeg bestaat er de nodige onduidelijkheid omdat er minstens drie verschillende systemen in omloop zijn: militair voor 1970, militair na 1970, en de IEEE of industriestandaard (zie *Figuur 2.5*). Nog meer verwarring ontstaat door het feit dat leger en defensie-industrie de aanduidingen voor 1970 en na 1970 door elkaar gebruiken en omdat de industrie vaak gebruik maakt van de militaire aanduidingen in plaats van de IEEE indeling

aanduiding	Frequentiebereik
HF	3-30 MHz
VHF	0-300 MHz
UHF	300-1000 MHz
L	1000-2000 MHz
S	2000-4000MHz
C	4000-8000 MHz
X	8000-12000 MHz
Ku	12-18 GHz
K	18-27 GHz
Ka	27-40 GHz
millimeter	40-300 GHz
submilimeter	> 300 GHz

*Figuur 2.5*

### 2.2.5 Skineffect

Er zijn drie redenen waarom op traditionele wijze gemonteerde elektronische componenten bij microgolffrequenties niet goed werken. De eerste reden is dat de afmetingen van component plus aansluitdraden in de orde van grootte ligt van de te verwerken golflengtes. De tweede is dat bij deze frequenties de verdeelde zelfinductie en capaciteit een rol van betekenis gaan spelen. De derde is het zogenaamde skineffect. Gelijkstroom loopt door de gehele dwarsdoorsnede van de geleider, maar wisselstroom is geconcentreerd in een smalle laag vlak onder de oppervlakte. De stroomdichtheid neemt vanaf het oppervlak van de geleider naar het midden toe exponentieel af (zie *Figuur 2.6*).



Bij de indringdiepte  $\delta$  is de stroomdichtheid gelijk aan  $1 / e = 1 / 2,718 = 0,368$  van de stroomdichtheid aan het oppervlak. De waarde van  $\delta$  is een functie van de frequentie, de permeabiliteit ( $\mu$ ) van de geleider, en het geleidingsvermogen ( $\sigma$ ).

$$\delta = \sqrt{1/2\pi \cdot f \cdot \sigma \cdot \mu}$$

waarin:

$\delta$  = indringdiepte

f = frequentie in Hz

$\mu$  = permeabiliteit in H/m

$\sigma$  = geleidingsvermogen in mho/m

### ***2.2.6 Microgolven en veiligheid***

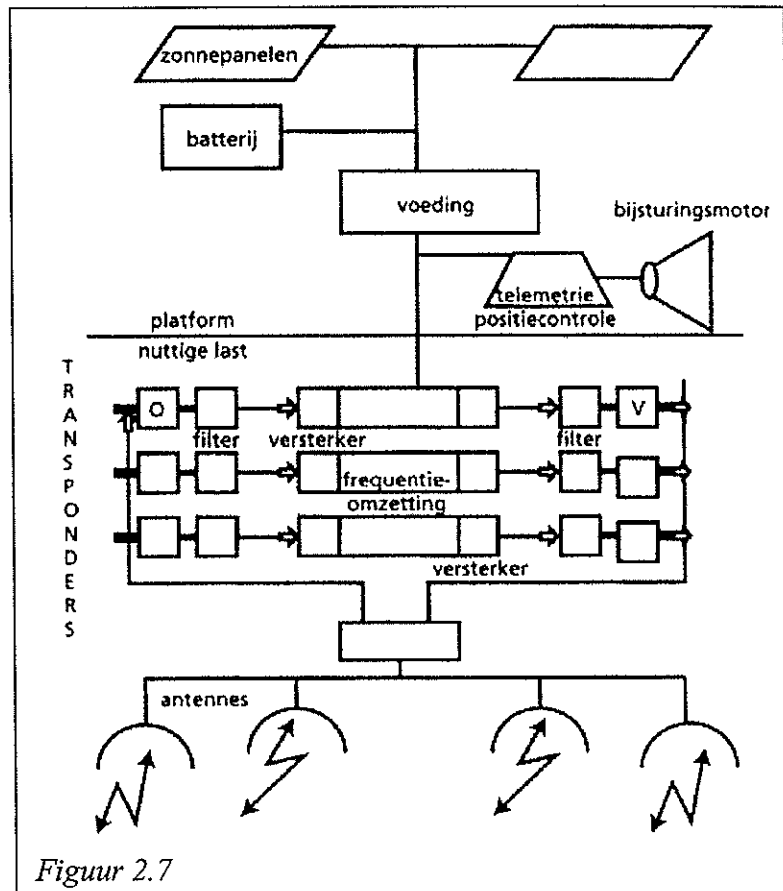
De HF-energie van microgolven kan gevaarlijk zijn voor de gezondheid. Als je er in de magnetron een pizza mee gaar kunt krijgen, mag je zeker aannemen dat het ook voor jezelf niet zonder risico is. De overheid heeft een veiligheidsnorm vastgesteld van 5 mW/cm<sup>2</sup> voor frequenties boven de 1500 MHz, maar die staat momenteel weer ter discussie. Het voornaamste probleem wordt gevormd door de verwarming van weefsels; vooral de ogen blijken zeer gevoelig te zijn voor microgolfenergie. Sommige deskundigen stellen dat langdurige blootstelling aan microgolven staar kan veroorzaken. Ook menen deskundigen dat er kans bestaat op genetische schade bij nakomelingen, naast andere lange-termijn effecten door cumulatieve blootstelling.

Vanwege hun relatief grote versterking kunnen microgolfantennes zelfs bij relatief geringe HF-vermogens al gevaarlijke veldsterktes produceren. Tenminste één technicus bij een grondstation voor satelliet-TV heeft na werkzaamheden aan een 15-meter diameter 3,5 GHz-schotel waaraan op dat moment HF-vermogen werd toegevoerd, last gekregen van verklevingen van zijn ingewanden, vaste deeltjes in zijn urine en geslachtelijke stoornissen. Hoewel dit geval een commercieel hoog-vermogen-station betrof met een zeer groot effectief afgestraald vermogen, toont het in elk geval wel aan dat ook bij de vermogens waar amateurs mee werken uiterste voorzichtigheid geboden is.

## 2.3 De satelliet (het ruimtesegment)

### 2.3.1 Het logistiek platform

Het logistiek platform bevat vooral elementen om de satelliet te laten functioneren en in een juiste positie te houden: de bijregelingsmotoren, de brandstofreservoirs (met hydrazine), het controlesysteem voor positie en stabilisatie. De telemetrie- en telecommando-uitrusting, het voedingssysteem met zonnepanelen en (oplaadbare) batterijen. De brandstof (hydrazine) is nodig om de bijregelingsmotoren te



Figuur 2.7

voeden, de voorraad brandstof bepaalt dan ook in grote mate de levensduur van de satelliet. Indien de satelliet niet meer kan worden bijgestuurd, is de kans groot dat hij “verdwijnt” in de ruimte. Daarom worden meestal, naar het einde van deze periode toe, reservesatellieten gelanceerd in de nabijheid van de oorspronkelijke satelliet, zodat deze, indien nodig, onmiddellijk kan worden vervangen.

### 2.3.2 De nuttige last

De nuttige last bevat de onderdelen die ervoor zorgen dat de satelliet zijn telecommunicatietaken kan vervullen. Deze onderdelen zijn de antennes en de transponders.

### 2.3.2.1 Antennes

Een satelliet ontvangt signalen die werden verzonden vanaf een bepaald punt op aarde (uplink) en zendt deze terug naar een ander punt op aarde (downlink); dit gebeurt door middel van een en dezelfde schotelantenne. De nuttige last van een satelliet beschikt over meerdere zulke antennes

#### 1. Frequenties voor de transmissie van satelliet signalen

- De vanuit een grondstation opgestraalde signalen verzwakken tijdens de “reis” doorheen de atmosfeer ten gevolge van regen, wolken, mist, sneeuw, enzovoort. Daarom wordt gebruik gemaakt van signalen die sterk genoeg zijn om deze storingen te overleven: er wordt uitgezonden in de SHF (Super High Frequency)-band. Het is immers zo dat een signaal aan sterkte wint naarmate de frequentie hoger wordt (en de golflengte dus kleiner).
- Net zoals bij (aardse) straalzenders worden bij satellieten verschillende frequenties gebruikt voor ontvangst en (her)uitzending, dit om te vermijden dat de (verzwakte) ontvangen signalen de (sterke) heruitgezonden signalen zouden storen. Zo kan bijvoorbeeld een signaal opgestraald worden met een frequentie van 6 GHz en teruggestraald worden met een frequentie van 4 GHz. Een andere mogelijkheid van uplink/downlink is 14/12 GHz. De frequentie van het heruitgezonden signaal is steeds lager dan dit van het opgestraalde signaal omdat op aarde meer energie beschikbaar is om het signaal te versterken dan in de ruimte.

#### 2. Frequentiebanden voor transmissie van satelliet signalen

Bij de transmissie van satelliet signalen kunnen verschillende frequentiegebieden (of – banden) worden gebruikt; een vergelijkbare situatie bestaat bijvoorbeeld bij transmissie van radiosignalen (lange-, middellange-, korte-, en ultrakortegolf).

De ontvangst en de verzending van de satelliet signalen gebeuren volgens internationale overeenkomsten in het frequentiespectrum van 4 tot 20 GHz. Typische en internationaal bepaalde frequentiebanden voor de uplink en de downlink zijn de C-band, de Ku-band en de Ka-band.

- **C-band:** De C-band ligt tussen 3,7 en 4,2 GHz en wordt vooral in de Verenigde Staten gebruikt voor de transmissie van televisiesignalen. Maar ook de Russisch Gorizont-satellieten zenden in deze band uit.
- **Ku-band:** In Europa wordt vooral gebruik gemaakt van de Ku-band (ook K-band genoemd). Vrijwel alle Europese satellietomroepen zenden (via Intelsat- of Eutelsat-satellieten) in deze band uit. De volledige Ku-band kan in drie “ sub ” banden worden opgedeeld: de Ku-1, de Ku-2 en de Ku-3
  - De **Ku-1** heeft een bereik van 10,95 tot 11,75 GHz en wordt hoofdzakelijk gebruikt door de Intelsat- en Eutelsat-satellieten; ook Astra maakt gebruik van de Ku-1.
  - **Ku-2** loopt van 11,75 tot 12,75 GHz en wordt gebruikt door veel omroepsatellieten zoals TDF-1, Tele-X, TV-sat, BSB en Olympus.
  - **Ku-3** tenslotte heeft een bereik van 12,5 tot 12,75 GHz en wordt vooral gebruikt voor videoconferenties en datacommunicatie via de Intelsat- en Eutelsat-satellieten. Ook de Franse Télécom-satelliet (die een aantal Franse televisiekanalen verspreidt) maakt gebruik van de Ku-3-band.
- **Ka-band:** Frequenties boven de 13 GHz worden aangeduid met de term Ka-band. Een aantal omroepsatellieten DFS-1 en -2, heeft transponders waarmee in deze band wordt gewerkt. Met zulke hoge frequenties is het mogelijk superkleine schotelantennes te gebruiken voor de ontvangst van signalen.

Er bestaan nog andere frequentiebanden die gebruikt worden door andere satellieten zoals de X-band (rond de 7 GHz) voor militaire satellieten en de L-band (1500-1700 MHz) voor mobiele en meteorologische satellieten.

### 2.3.2.2 Transponders

Een satelliet is functioneel onderverdeeld in een aantal zelfstandige kanalen die transponders (Transmitters-Responders) worden genoemd. Dit zijn gecombineerde zenders/ontvangers. Deze zijn verantwoordelijk voor de ontvangst, de frequentie-omzetting, de versterking en

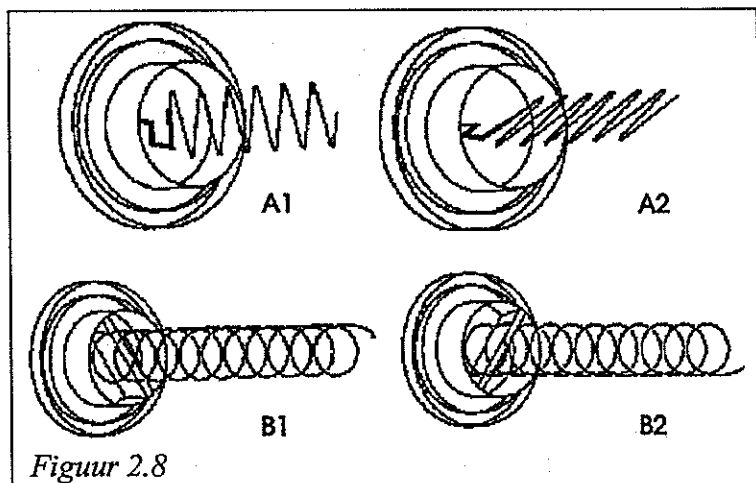
de heruitzending van de signalen. De energie voor het uitvoeren van al deze activiteiten wordt geleverd door de zonnepanelen.

### 1. Functie van de transponder

- De belangrijkste functie van de satelliet is het opvangen en terugzenden van signalen: een signaal wordt ontvangen, versterkt en terug naar de aarde gestuurd. Zoals reeds gesteld verloopt de up- en de downlink van een satelliet signaal via dezelfde antenne; om onderlinge beïnvloeding (interferentie) van deze twee signalen te verhinderen wordt de uplink in een hogere frequentie verzonden dan de downlink; hiervoor is dus wel een frequentie-omzetting nodig na ontvangst en voor verzending. Aan elke transponder wordt een verschillende band (een aparte frequentie) toegekend voor verzending en ontvangst.
- De bandbreedte van elke transponder varieert van toepassing tot toepassing. Voor de transmissie van televisiesignalen wordt vaak een bandbreedte van 36 MHz toegepast. Er worden echter vaak voor tele- en datacommunicatietoepassingen grotere bandbreedtes gebruikt (tot meer dan 200 MHz).

### 2. Polarisation

Satelliet signalen kunnen net zoals de gewone radiosignalen op twee manieren worden verzonden/ontvangen, namelijk lineair of circulair. De manier waarop de golfbeweging van het signaal wordt opgewekt heet polarisation; aldus kan een onderscheid worden gemaakt



tussen lineaire en circulaire polarisation.

- **Lineaire polarisation** is de klassieke manier van signaaltransmissie (onder andere ook gebruikt bij televisie- en FM-radio). Bij lineaire polarisation planten de signalen zich in



één vlak voort: ofwel in horizontale (zie *Figuur 2.8 A2*) ofwel in verticale (zie *Figuur 2.8 A1*) richting. Bij horizontale lineaire polarisatie doen ze dit in horizontale en bij verticale lineaire polarisatie in verticale richting. De meeste TV-zenders in Europa polariseren horizontaal; daarom dat de elementen van een klassieke TV-antenne in horizontale richting bevestigd zijn.

- Bij **circulaire polarisatie** maakt het signaal een soort kurkentrekkerbeweging, waarbij net zoals bij lineaire polarisatie er zich twee soorten bewegingen kunnen voordoen: rechtsdraaiend (zie *Figuur 2.8 B2*) en linksdraaiend (zie *Figuur 2.8 B1*).

Omroepsatellieten zenden meestal uit in circulaire polarisatie, telecommunicatiesatellieten in lineaire polarisatie, al is dit onderscheid geen vaste regel.

- **De voordelen van polarisatie:** Golven waarvan de polarisatie loodrecht op elkaar staat (zoals een verticaal en een horizontaal gepolariseerde golf) werken niet op elkaar in. Het is dus mogelijk dergelijke golven op eenzelfde frequentie uit te zenden. Dank zij deze polarisatietechniek kan men aldus twee transponders laten werken in dezelfde frequentieband zonder dat interferentie optreedt, waardoor de capaciteit van een satelliet aanzienlijk wordt verhoogd. Het is bijvoorbeeld mogelijk om 12 transponders met een bandbreedte van 83 MHz te installeren in de frequentieruimte van 14 tot 14,5 GHz (wat slechts 500 MHz is).

### 3. Transmissiemethoden

Elke transponder kan simultaan de signalen van verschillende grondstations (zenders) behandelen. Eén grondstation kan ook de signalen van verschillende transponders behandelen.

Hiervoor bestaan twee belangrijke methoden: FDMA en TDMA

- **FDMA:** Deze methode is de meervoudige toegang met frequentieverdeling (Frequency Division Multiple Access), wat overeenkomt met frequentiemultiplexing. Het komt erop neer dat de frequentieband van de transponder wordt opgedeeld in subbanden met een verschillende draaggolffrequentie. De transponder kan derhalve de signalen van verschillende grondstations bij ontvangst van elkaar onderscheiden, door hun

verschillende frequentie. Dit principe werkt ook in de omgekeerde richting. FDMA kan immers worden toegepast door grondstations die op die manier verschillende signalen van een of meerdere transponders kunnen onderscheiden op basis van de frequentie van de draaggolf. Voorbeeld bij de werking van FDMA bij telefonie: Stel dat een bepaalde transponder wordt gebruikt voor de internationale telefonie. Het frequentiegebied van één telefoongesprek bedraagt 4 kHz; voor een tweede gesprek wordt daar nog eens 4 kHz aan toegevoegd, enzovoort, voor alle gesprekken; dit betekent dus dat alle gesprekken worden “ opgestapeld ” tot de volledige bandbreedte van de transponder vol is (bijvoorbeeld zo’n duizend gesprekken). De hoeveelheid “ gestapelde ” gesprekken vormt de basisband. Opdat het zou kunnen worden verzonden, moet dit basisbandsignaal op een krachtige draaggolf worden gezet (dit noemt men frequentiemodulatie). De frequentie van de draaggolf wisselt in functie van de informatie van de basisband. Door de volledige bandbreedte van een transponder te verdelen in verschillende FM-gemoduleerde draaggolven met elk een eigen frequentieband, kunnen meerdere signalen toegang krijgen tot deze transponder. Dit principe noemt men FDMA.

- **TDMA:** De tweede methode is de meervoudige toegang met tijdsverdeling (Time Division Multiple Access), wat overeenkomt met tijdmultiplexing. De volledige capaciteit van een transponder wordt verdeeld in tijdseenheden; de diverse grondstations gebruiken dezelfde draaggolfrequentie maar krijgen beurtelings één tijdseenheid toegemeten om een deeltje van een signaal (de zogenaamde burst) uit te zenden. Bij telefonie bijvoorbeeld krijgt elk telefoonkanaal periodiek (bijvoorbeeld 8000 maal per seconde) een tijdseenheid ter beschikking om een aantal bits (bijvoorbeeld 8) van het digitaal gecodeerde telefoongesprek te versturen. Op die manier kan bijvoorbeeld een transponder met een capaciteit van 72 MHz 1 888 kanalen van 64 Kbps aan, indien de transmissiesnelheid 120 Mbps bedraagt. In de praktijk ligt het aantal kanalen wel wat lager omdat tussen verschillende bursts wat tijd moet worden gelaten, zodat geen overlappings kunnen optreden tussen opeenvolgende bursts. Omdat TDMA gebaseerd is op de transmissie van de data in pakketten (van een aantal bits), moeten de signalen digitaal zijn.

## 4. De footprint

De vorm van de signaalbundel die wordt teruggezonden naar de aarde is in de meeste gevallen ellipsvormig: dit is de zogenaamde contour of footprint (zie 2.4.2).

## 2.4 De Up- en downlink

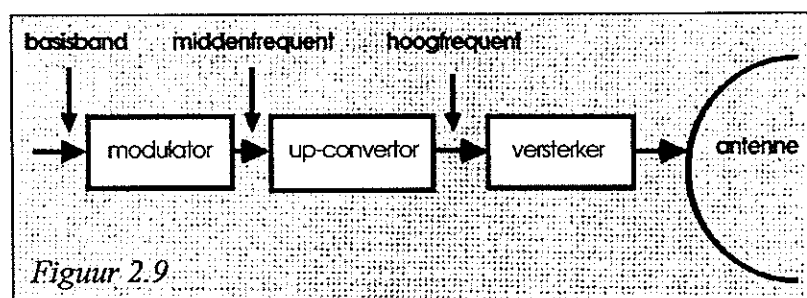
### *2.4.1 Het verzenden en ontvangen van satellietsignalen*

Een integraal satellietstelsel bestaat niet enkel uit een ruimte-element maar ook uit een infrastructuur voor het opstralen (uplink) en ontvangen (downlink) van de signalen op aarde: het grondstation.

Een grondstation voor satellietcommunicatie vormt meestal een opvallend element in het landschap vanwege de omvang van de antenne en de stevige sokkel en door het feit dat grondstations meestal in open ruimten staan opgesteld om zo weinig mogelijk te worden gehinderd door “obstakels” zoals bouwwerken, hoge bomen, hoogspanningsmasten, enzovoort. De drie belangrijkste functionele onderdelen van een grondstation zijn: de zendapparatuur, de ontvangstapparatuur en de antenne.

#### 2.4.1.1 De zendapparatuur

De zendapparatuur dient voornamelijk voor de modulatie, conversie en versterking van het te verzenden signaal (zie Figuur 2.9).



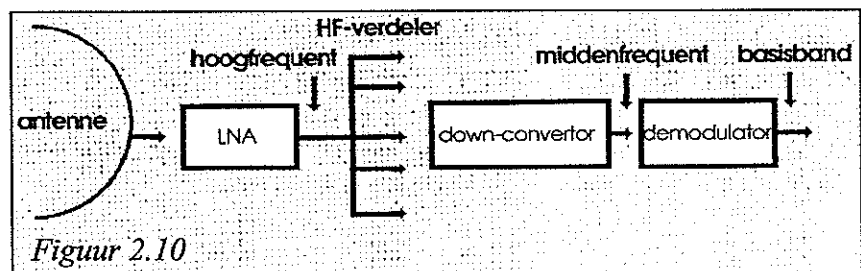
- Alle gegevens die aan de zendapparatuur worden toegevoerd (bijvoorbeeld telefoonsignalen), vormen het zogenaamde basisbandsignaal. Alvorens dit signaal kan worden getransporteerd via de satelliet, moet het eerst op een zogenaamde draaggolf geplaatst worden; dit is een krachtiger signaal met een hogere frequentie (rond de 100

MHz). Met andere woorden: het basisbandsignaal wordt omgezet in een zogenaamd middenfrequent signaal. Dit is de taak van de modulator.

- De zendfrequentie van satelliet signalen bedraagt echter verschillende Gigahertz (hoogfrequent signaal). Het gemoduleerde signaal is slechts een middenfrequent signaal. Dit middenfrequent signaal moet derhalve door een up-converter in de antenne van het grondstation worden omgezet naar hoogfrequent signaal van bijvoorbeeld 6 GHz.
- Nadat het signaal is geconverteerd, moet het nog voldoende vermogen krijgen om de 36 000 km zonder al te veel problemen af te leggen; daarvoor zorgt de eindversterker.

#### 2.4.1.2 De ontvangstapparatuur

Bij de ontvangst van satelliet signalen dient in feite het omgekeerde te gebeuren van wat bij de verzending het geval is:



versterking, conversie en demodulatie.

- De signalen die vanuit de satelliet het grondstation bereiken, zijn zeer verzwakt en hebben nog slechts een klein vermogen. Deze signalen moeten dus eerst versterkt worden; tegelijkertijd worden een aantal technieken toegepast om de hoeveelheid storende informatie (ruis) tot een absoluut minimum te beperken waarvoor men de ruisarme voorversterker of de (Low Noise Amplifier) gebruikt.
- Via de totale bandbreedte waarin de satelliet uitzendt, kunnen verschillende draaggolven worden verzonden. Bij ontvangst dient echter slechts één signaal te worden “geselecteerd”, namelijk dit met de basisbandinformatie waarin de ontvanger geïnteresseerd is. Daarom bevat een grondstation een hoogfrequente verdeler die uit het totale aanbod (over de volledige bandbreedte) de verschillende draaggolven detecteert en selecteert.
- Daarna wordt voor elke te ontvangen draaggolf die frequentie omlaag gebracht (van hoogfrequent naar laagfrequent) door een down-converter.

- Tenslotte zorgt de demodulator ervoor dat de basisbandinformatie beschikbaar komt door ze te ontdoen van de draaggolf.

### 2.4.1.3 De antenne

De antenne kan in principe zowel voor de ontvangst als voor de verzending fungeren.

De omvang van de antenne is hoofdzakelijk afhankelijk van het vermogen van het te verzenden en te ontvangen signaal: hoe krachtiger het te verzenden signaal, des te groter de antenne, hoe krachtiger het te ontvangen signaal, des te kleiner de antenne. Voor satellietcommunicatie worden vrijwel hoofdzakelijk schotelvormige antennes gebruikt (zie 2.5).

### *2.4.2 Het verzorgingsgebied van een satelliet*

De geostationaire satelliet bevindt zich op ongeveer 36 000 km boven het aardoppervlak. Het geografische gebied dat wordt bestreken door de bundel die de satelliet - antenne uitzendt, samen met het eraan gekoppelde vermogen, kenmerken het verzorgingsgebied (stralingsdiagram, footprint, voetafdruk) van een satelliet. Het valt licht te begrijpen dat het ontvangen vermogen afneemt, naarmate men zich verder van de centrale as van de bundel verwijderd; dit betekent dat de diameter van de ontvangstantenne evenredig toeneemt met de afstand tot het centrum van het verzorgingsgebied.

Voor elke telecommunicatiesatelliet bestaan er kaarten die in de vorm van gesloten lijnen het isotroop afgestraalde vermogen weergeven (de “spotbeam – contouren”). Dit betekent dat op elk punt van een dergelijke lijn, het ontvangen vermogen gelijk blijft (analoog met de hoogtelijnen op een stafkaart). Die kaarten zijn bijzonder nuttig omdat we er de diameter van de ontvangstantenne mee kunnen bepalen, afhankelijk van de plaats van ontvangst.

Het vermogen op een bepaald punt wordt gemeten in EIRP: effectief isotroop afgestraalde vermogen (Effective Isotropically Radiated Power), uitgedrukt in decibel-watt of dbW. Er geldt t.o.v 1 Watt:

$$\text{Voor een toename: dbW} = 10 \log (P / 1)$$

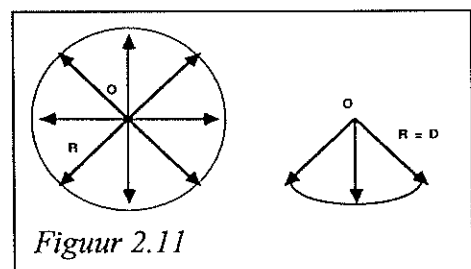
Voor een afname:  $dbW = 10 \log (1 / P)$

Wanneer het vermogen van een signaal A gelijk is aan P dan kunnen we de dbW berekenen: die drukt de relatieve toename/afname uit t.o.v. 1 Watt. Wanneer bijvoorbeeld P = 2 watt, krijgen we een toename met 3,0103 dbW. Van 1 naar 2 Watt, d.w.z een verdubbeling, komt een stijging van 3,0103 dbW op logaritmische schaal overeen; een overeenkomstige afname komt overeen met - 3,0103 dbW. Soms wordt ook de dbm - schaal gebruikt: dan wordt de vermogenstoename uitgedrukt t.o.v. een milliwatt. In de afkorting EIRP staan de I en de P voor "Isotropic" en "Power" of isotroop vermogen. Dit komt overeen met het vermogen dat in alle richtingen uitgestraald zou worden door een isotrope antenne, net zoals een bolvormige lamp haar licht in alle richtingen uitstraalt. Maar de zendantenne van de satelliet is parabolisch, dit betekent dat ze een smalle gerichte bundel uitstraalt, net zoals een lamp in een reflector. De transponder van de satelliet levert een microgolf-vermogen  $P_e$ . Indien deze was uitgerust met een isotrope antenne, d.w.z. die in alle richtingen straalt, dan zou het vermogen per oppervlakte-eenheid  $P_s$  gelijk zijn aan  $P_e/4\pi R^2$ . Dit is de verhouding tussen het totale uitgestraalde vermogen  $P_e$  en de totale oppervlakte  $4\pi R^2$  van een bol met straal R, die de antenne omgeeft.

In werkelijkheid is de satelliet voorzien van een zeer richtingsgevoelige antenne: ze wijst met een absolute versterking  $G_e$  in de richting van de ontvanger. In deze omstandigheden is de vermogensdichtheid in die richting, op een afstand D (= R ) gelijk aan:

$$P'_e = (P_e/4\pi D^2) \cdot G_e$$

Figuur 2.11 toont een vergelijking tussen de straling van een isotrope en een gerichte antenne.



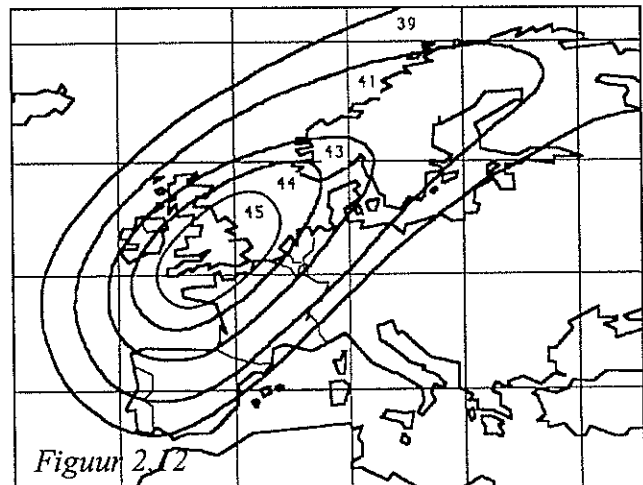
In werkelijkheid wordt op aarde niet dat vermogen per eenheid van oppervlak ontvangen: omwille van de afstand en de atmosferische verliezen wordt het signaal tussen de satelliet en de aarde zwakker. Uiteindelijk is het vermogen per vierkante meter dat echt wordt ontvangen, bijzonder klein. Indien de transponder bijvoorbeeld een vermogen van enkele tientallen Watts uitstraalt, via een antenne van ongeveer een vierkante meter, zal het op aarde ontvangen vermogen nog slechts  $10^{-18} \text{ W/m}^2$  bedragen. Ter vergelijking: dit is het

vermogen dat u zou ontvangen, wanneer u een lichtbron van enkele tientallen Watts zou bekijken die op een afstand van 36 000 km opgesteld staat.

De EIRP kan worden berekend, op basis van het vermogen  $P_e$  van de transponder en de versterkingsfactor van de zendantenne van de satelliet.  $4\pi D^2$  wordt hier nu weggelaten omdat in het hart van de bundel de noemer geen rol speelt. Indien bijvoorbeeld  $P_e = 100$  W en  $G_e = 100$ , dan is:

$$\text{EIRP} = 10 \log (P_e \cdot G_e/1)$$

Hetzij een EIRP van 40 dbW in het verlengde van de as van de antenne d.w.z. in het hart van de bundel die de aarde bereikt (centrale zone van het verzorgingsgebied). De figuur 2.12 bevat een paar stralingsdiagrammen (van Intelsat 5A F11, stationair op  $27,5^\circ$  westerlengte) met de vermelding van de EIRP in dbW in functie van de plaats van ontvangst.



Figuur 2.12

### 2.4.3 Downlink – budget

De diameter van de paraboolantenne en de keuze van het LNB (Low Noise Block) hangt af van de kwaliteit van de verbinding satelliet-ontvangststation. Factoren die de keuze bepalen, zijn: het zendvermogen van de satelliet, de standaard-demping en de demping wegens omstandigheden (regen, onweer, ...) waaraan het microgolfsignaal onderweg onderhevig is, fouten bij het uitrichten van de antenne, vervormingen van de ontvangstantenne, polarisatiefouten, obstakels in de buurt van de ontvanger. Deze beperkende factoren kunnen in de vorm van een vergelijking worden uitgedrukt, die het “downlink-budget” wordt genoemd.

#### 2.4.3.1 Ideale verbinding

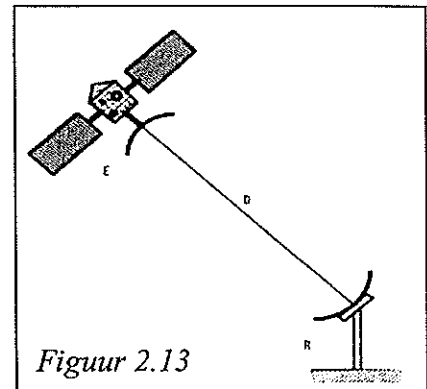
Bij de ideale verbinding beschouwen we tussen de uitzending door satelliet en de ontvangst op aarde geen verliezen (zie Figuur 2.13). De zendantenne heeft een versterking  $G_e$ ; het

zendvermogen is  $P_e$  en de hoogte van de satelliet is  $D$ . In de richting  $D$  straalt ze per eenheid van oppervlakte een vermogen  $P_{es}$  uit:

$$P_{es} = P_e \cdot G_e / 4\pi D^2$$

Het vermogen  $P_R$  dat door de ontvangstantenne met een equivalente oppervlakte  $S_R$  wordt bestrijkt, is:

$$P_R = G_e \cdot P_e \cdot S_R / 4\pi D^2$$



Merk op dat  $G_e \cdot P_e$  hier met het EIRP van de uitzending overeenkomt. We noemen  $E_R$  het rendement en  $\lambda$  de golflengte. De versterking  $G_R$  van de ontvangstantenne wordt dan gegeven door:

$$G_R = 4\pi \cdot S_R \cdot E_R / \lambda^2$$

Wat we ook kunnen schrijven als:

$$G_R = 4\pi \cdot S'_R / \lambda^2$$

waarin  $S'_R = S_R \cdot E_R$  staat voor de equivalente oppervlakte van de antenne, d.w.z. haar reële oppervlakte  $S_R$  vermenigvuldigd met haar rendement  $E$ . Op die manier is de verhouding tussen ontvangen vermogen en uitgestraald vermogen, evenredig met de respectieve versterking van de zend- en ontvangstantennes, en met het kwadraat van de golflengte en omgekeerd evenredig met het kwadraat van de antennediameter, volgens de vergelijking:

$$P_R / P_e = G_e \cdot G_R \cdot (\lambda / 4\pi D)^2 \quad (2.5)$$

De demping  $a_i$  die met deze ideale verbinding overeenkomt is het omgekeerde van de voorgaande verhouding. In logaritmische vorm wordt de demping  $a_i$  uitgedrukt in decibel:

$$a_i = 10 \log \cdot (4\pi \cdot D / \lambda)^2 \cdot (1 / G_e \cdot G_R) \quad \text{in dB} \quad (2.6)$$

In werkelijkheid houdt de demping volgens (2.6) geen rekening met verliezen, veroorzaakt door de voortplanting van de golven en met de tekortkomingen in het ontvangstation. Dit zullen we in het volgende punt bestuderen.



### 2.4.3.2 Reële verbinding

We moeten dus rekening houden met de reële verliezen, die we algemeen als een correctiefactor  $A_r$  in de vergelijking (2.6) kunnen inbrengen. Dit geeft:

$$a_r = 10 \log \cdot (4\pi \cdot D / \lambda)^2 \cdot (A_r / G_E \cdot G_R)$$

De verliescoëfficiënt  $A_r$  bevat:

- verliezen door de voortplanting in de ionosfeer en de atmosfeer
- verliezen ten gevolge van uitricht-fouten door de ontvanger
- verliezen door de polarisatie
- verliezen wegens obstakels in de buurt van het station
- verliezen omwille van diverse aanpassingsfouten in het ontvangstation

Het ontvangen vermogen  $P_R$  verschilt in dit geval van (2.5), omwille van de correctiefactor  $A_R$ . We schrijven:  $P_R = P_e \cdot (G_e \cdot G_R / A_R) \cdot (\lambda / 4\pi \cdot D)^2$

Uit deze uitdrukkingen kunnen we de vergelijking afleiden voor de signaal/ruis-verhouding: de verhouding tussen het vermogen  $S$  van het ontvangen signaal in een gegeven frequentieband  $B = \Delta f$  (doorlaatband van de ontvanger) en het ruisvermogen  $N$  (van Noise). Het ruisvermogen wordt berekend volgens de stelling van Nyquist:  $N = kTB$ ; we drukken de signaal/ruisverhouding dan ook in decibel uit:

$$S/N = 10 \log [P_e \cdot (G_e \cdot G_R / kTBA_r) \cdot (\lambda / 4\pi \cdot D)^2]$$

Indien het ontvangen vermogen van een zuivere draaggolf afkomstig is, d.w.z. die niet werd gemoduleerd (aangeduid door  $C$ , van "Carrier"), wordt  $S$  in de voorgaande uitdrukking door  $C$  vervangen; we krijgen dan de volgende vergelijking:

$$C/N = 10 \log (P_e \cdot G_e) + 10 \log G_R - 20 \log (4\pi D / \lambda) - 10 \log A_R - 10 \log (kTB) \quad (2.7)$$

waarin de termen aan de rechterzijde van het gelijkheidsteken respectievelijk staan voor:

- het EIRP
- de versterking van de parabolische ontvangstantenne
- de demping in de vrije ruimte, in functie van de afstand en de golflengte

- de demping ten gevolge van de voortplanting en andere oorzaken
- het totale ruisvermogen (d.w.z. van de antenne, het LNA en de overige componenten van de ontvanger samen)

#### 2.4.3.3 Vergelijking van de verbinding: C/N - verhouding

De vergelijking (2.7) kan op een eenvoudiger manier worden geschreven, zoals ze in de praktijk wordt gebruikt om de kwaliteit van de verbinding in te schatten. We schrijven:

$$C/N = E + G - A - 10 \log T - 10 \log B - 10 \log k$$

waarin:

- E = EIRP in dBW
- G = versterking van de paraboolantenne in dB
- A = globale demping in dB
- T = ruistemperatuur van de antenne en de LNA
- B = middenfrequent-bandbreedte van de ontvanger en  $-10 \log k = +228,6$  dB

Met andere woorden: deze vergelijking bepaalt de grenswaarde van de signaal/ruis-verhouding die een ontvanger nog aankan. Voor een goede ontvanger ligt deze drempel tussen 7,5 dB en 9 dB, d.w.z. 8 dB gemiddeld. C/N dient dus gelijk te zijn of groter dan deze gemiddelde waarde, zodat er een marge is wanneer er tijdelijk extra demping optreedt omwille van een regenbui of onweer.

#### 2.4.3.4 Kwaliteitsgetal G/T van het station:

Vaak worden de prestaties van een ontvangstation gekenmerkt door zijn kwaliteitsfactor G/T in dB:  $(G/T)_{dB} = 10 \log (G_R / T)$

Uit de vergelijking van de C/N-verhouding halen we dat:

$$(G/T)_{dB} = C/N - E + A + 10 \log B + 10 \log k$$

Op grond van deze uitdrukking, kunnen we de versterking G van de antenne berekenen, wanneer we  $T = T_A + T_{LNA}$  kennen ( $T_A$  is de ruistemperatuur van de antenne bij een bepaalde elevatie en  $T_{LNA}$  is de ruistemperatuur van het LNA).