

# Løsningsforslag til regneoppgave brukt ved Forskerkurs i «Ikke-ioniserende stråling og dens biologiske virkning. Del B»

(FYS490 i UiO systemet). Kurset ble holdt i Oslo Uke 14 2000

## Arnt Inge Vistnes

Fysisk institutt  
Universitetet i Oslo

### 1

En basestasjon for mobiltelefoni sender ved 930 MHz. Bølgelengden  $\lambda$  er da:

$$\lambda = c/f$$

hvor  $c$  er lyshastigheten og  $f$  frekvensen på bølgene. Setter vi inn tallverdier, får vi:

$$\lambda = \frac{3 \cdot 10^8}{930 \cdot 10^6} \text{ m} = 0.32 \text{ m}$$

Bølgelengden er altså omtrent 32 cm.

### 2

Avstanden mellom antennemast og nærmeste hushjørne er ca 30 m. Skråavstanden mellom hus og selve antenneelementet er enda større. Dette er i størrelsesorden 100 ganger bølgelengden. Dermed vi betegner feltforholdene om lag en bølgelengde vekk fra en kilde som nærfelt, og felt godt utenfor en bølgelengde som fjernfelt, vil det si at feltforholdene fra basestasjonen må betegnes som fjernfelt på husets plass.

Dette får følger når vi senere i oppgaven skal beregne elektrisk og magnetisk felt i bølgene fra basestasjonantennen. Vi kan ved huset anta at  $E$  og  $H$  er vinkelrett på hverandre og at størrelsene er relatert til hverandre som vel kjent for plane elektromagnetiske bølger.

### 3

Når vi skal bestemme maksimal tenkelig strålingsintensitet for beboerne i huset, tar vi utgangspunkt i:

a) Utstrålt effekt fra antennen er oppgitt til 43 dBm minus 4 dB tap i antenneledning. Enheten dBm er en vanlig dB-skala, men med fast referanse, nemlig 1 mW. Utstrålt effekt finner vi da på

følgende måte:

$$10 \cdot \log\left(\frac{P_{\text{utstrålt}}}{1 \text{ mW}}\right) = (43 - 4) \text{ dBm} = 39 \text{ dBm}$$

$$P_{\text{utstrålt}} = 10^{3.9} \cdot 1 \text{ mW} = 7.9 \text{ W}$$

**b)** Antennens forsterkningsfaktor er oppgitt til 18.1 dBi, det vil si at strålingsintensiteten i hovedlobens maksimumsretning er 18.1 dB høyere enn dersom strålingen hadde vært isotropt fordelt (like stor i alle retninger). Vi kan ikke legge til 18.1 dB til utstrålt effekt funnet ovenfor, fordi effekten som sendes ut faktisk ikke er mer enn 7.9 W. Forsterkningsfaktoren kan derfor først benyttes når vi beregner *strålingsintensiteten* til bølgene i en eller annen retning (målt i  $\text{W/m}^2$ ).

Vi kan f.eks. regne ut intensiteten til strålingen 30 m fra antennen. Velger vi da å se på intensiteten akkurat i den retningen hovedloben har et maksimum, vil vi finne følgende resultat:

Intensiteten i 30 m avstand i tilfelle strålingen var isotrop:

$$I_{\text{isotrop}}(30 \text{ m}) = \frac{P_{\text{utstrålt}}}{A_{\text{kuleflate, radius 30 m}}} = \frac{7.9 \text{ W}}{4\pi(30 \text{ m})^2} = 6.99 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2$$

Intensiteten i 30 m avstand i hovedlobens maksimumsretning finner vi på følgende måte:

$$10 \cdot \log\left\{\frac{I_{\text{max i hovedlobe}}(30 \text{ m})}{I_{\text{isotrop}}(30 \text{ m})}\right\} = 18.1 \text{ dBi}$$

$$I_{\text{max i hovedlobe}}(30 \text{ m}) = 10^{1.81} \cdot I_{\text{isotrop}}(30 \text{ m}) = 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

**c)** Tiden er nå inne for å finne intensiteten i den retningen der maksimal stråling treffer huset. Vi må da ta hensyn til retningsdiagrammene for antennen.

La oss starte med den enkleste: Horisontaldiagrammet. Ut fra kartet kan vi ved hjelp av en gradskive eller ved å måle sider i rettvinklede trekantene og bruke definisjonene på de trigonometriske formlene, finne at minste horisontale vinkelavstand mellom hovedlobens maksimum og huset, er ca 23 grader. Største vinkelavstand er 50 grader.

En horisontalvinkel på 23 og 50 grader tilsvarer en svekket intensitet på henholdsvis 1.5 dB og 6.8 dB (leses ut av horisontaldiagrammet).

Ved vurdering av retningsdiagrammer for antenner gjør en oftest antakelsen at vi kan betrakte horisontaldiagrammet og vertikaldiagrammet for seg, og at den totale dempingen/forsterkningen oppgitt i dB er lik summen av bidragene fra hvert av de to diagrammene.

Vi må nå bestemme demping av intensiteten på grunn av at hovedloben ikke treffer huset i vertikalplanet. Vi kan starte ut med å bestemme maksimums- og minimumsvinklene mellom horisontalplanet gjennom antennen, og ulike deler av huset.

Vi tar utgangspunkt i:

- Horisontalavstander målt ut fra kartet (min 30 m, max 49 m).
- Opplysningen om at midtpunktet av antennen er 21.8 m over bakken der antennemasten er plassert.
- Bakkenivået der huset ligger er ca 1.5 m lavere enn bakken der antennemasten er plassert (vurdert ut fra høydekurvene på kartet).
- Gulvet i første etasje anslås til å være 0.5 m over bakken (vurdert ut fra foto).
- Hver etasje antas å være ca 2.7 m høy (anslag ut fra at vanlige bolighus har ca 2.4 m fra gulv til tak).

Herav følger at vertikalavstanden mellom midten av antenneelement og gulv i første etasje er ca:

$$h_{max} = (21.8 + 1.5 - 0.5) \text{ m} = 22.8 \text{ m} \approx 23 \text{ m}$$

Vertikalavstanden mellom midten av antenneelementet og hodet til en voksen person som står oppreist i annen etasje er da ca:

$$h_{min} = (23 - 2.7 - 1.8) \text{ m} \approx 18 \text{ m}$$

Maksimal og minimal vertikal vinkel er da:

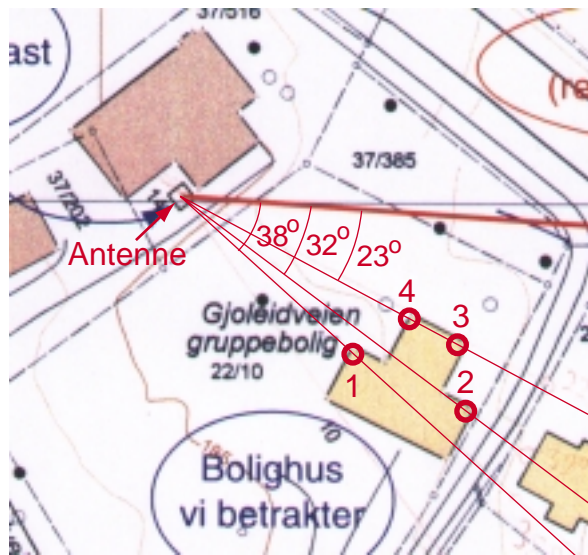
$$\theta_{max} = \arctan\left(\frac{23}{30}\right) = 37^\circ$$

$$\theta_{min} = \arctan\left(\frac{18}{49}\right) = 20^\circ$$

Vi ser av antennediagrammet at den nest største loben har en demping på bare ca 9 dB i forhold til hovedloben, og en vinkel på ca 21 grader under horisontalplanet. Siden antennen er "piltet" 2 grader oppover, betyr det at den aktuelle "underloben" har sitt maksimum 19 grader under horisontalplanet. Dette er omtrent den retningen som svarer til minimum vinkel til huset.

Vi ser av vertikaldiagrammet at strålingsintensiteten avtar raskt for vertikalvinkler vesentlig større enn 20 grader under horisontalplanet. Det synes derfor unødvendig å kartlegge strålingsintensiteten i første etasje, siden strålingen her forventes å være lavere enn i annen etasje.

Vi kan lure på om vi får størst strålingsintensitet i annen etasje på det stedet som ligger lengst unna (horisontalavstand), men med minst vertikal vinkel, eller om vi får størst strålingsintensitet på det stedet der horisontalavstanden er minst, men vertikal vinkel noe større. Vi gjennomfører en utregning for begge tilfeller pluss tilsvarende tilfeller der horisontalvinkelen er så liten som mulig:



Første tilfelle (punkt 1 i skissen ovenfor): Hodehøyde i annen etasje, så nær antennen som mulig.

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{18}{30}\right) = 31^\circ$$

Andre tilfelle (punkt 2 i skisse): Hodehøyde i annen etasje, så langt bort fra antennen som mulig (men gunstigst mulig vertikalvinkel).

$$\theta_2 = \arctan\left(\frac{18}{47}\right) = 21^\circ$$

Tredje tilfelle (punkt 3 i skisse): Hodehøyde i annen etasje, så liten horisontalvinkel og den da minste vertikalvinkel som mulig:

$$\theta_3 = \arctan\left(\frac{18}{42}\right) = 23^\circ$$

Fjerde tilfelle (punkt 4 i skisse): Som for punkt 3, men nærmest mulig antenne:

$$\theta_4 = \arctan\left(\frac{18}{34}\right) = 28^\circ$$

**d)** Vi er nå snart klar for å samle alle opplysningene vi har kommet fram til, men vi må også få trukket inn dempingen som skyldes forskjellig avstand fra antennen i de ulike punkt. For å forenkle sammenligningen mellom de ulike punktene, beregner vi en demping i dB som skyldes at avstanden er forskjellig fra de 30 m vi hittil har brukt som en slags referanse. Denne dempingen finner vi ved å huske at intensiteten avtar med kvadratet av avstanden, slik at dempingen blir:

$$\text{Demping pga avstand (rel 30 m) (i dB)} = 10 \cdot \log \left\{ \left( \frac{\text{virkelig avstand til antenne}}{30 \text{ m}} \right)^2 \right\}$$

Den totale demping ut fra retningsdiagrammene og avstandsvariasjonene, blir da som gitt i følgende tabell (“piltingen” tatt i betraktning):

**Tabell 1: Kombinasjon av horisontal og vertikal demping, og demping som skyldes en avstand forskjellig fra 30 m, i fire utvalgte punkt**

Punkt	hor.v.	demp.	vert.v.	demp.	hor.avst.	skrå avst.	rel.demp.	tot
1	38°	4.0 dB	31°	34.4 dB	30 m	35 m	1.3 dB	39.7 dB
2	32°	2.9 dB	21°	10.1 dB	47 m	50 m	4.4 dB	17.4 dB
3	23°	1.5 dB	23°	12.5 dB	42 m	46 m	3.7 dB	17.7 dB
4	23°	1.5 dB	28°	25.9 dB	34 m	38 m	2.1 dB	29.5 dB

PS: Tallene for demping er mer nøyaktige enn en lett kan lese ut fra retningsdiagrammene. Dette skyldes at jeg har tilgjengelig tabellerte verdier for hver grad i retningsdiagrammet. Ellers ville bare verdier i hele dB normalt kunne avleses.

Vi ser at det i annen etasje faktisk er i de delene av huset som er *lengst unna antennen* som har høyest strålingsintensitet. Dette er temmelig uventet, men grunnen er den steile flanken for den nest kraftigste loben i det vertikale retningsdiagrammet for antennen.

Det er antatt at dempingen pga husveggene er så liten at vi kan se bort fra denne.

e) Vi kan nå endelig regne ut den endelige strålingsintensiteten i den delen av huset som har kraftigst bestråling. Om en velger punkt 2 eller 3 kommer stort sett ut på ett:

$$10 \cdot \log \left\{ \frac{I(\text{punkt 2})}{I_{\max \text{ i hovedlobe}}(30 \text{ m})} \right\} = -17.4 \text{ dB}$$

$$I(\text{punkt 2}) = 10^{-1.74} \cdot 4.5 \cdot 10^{-2} \text{ W/m}^2$$

$$I(\text{punkt 2}) = 8.2 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2 = 0.82 \text{ mW/m}^2$$

Vi har ovenfor gjennomført beregninger der vi etter tur har trukket inn effekt, antenneforsterking, demping fordi huset ikke ligger midt i hovedloben, og demping pga avstand, hver for seg. Nå, når vi først kjenner spillereglene, kan det til slutt være instruktivt å se hvordan en kan gjøre det hele en smule raskere. Siden dB skalaen er en logaritmisk-forhold-skala, kan vi addere dB

verdier nesten uten å behøve å tenke. Tar vi utgangspunkt i punkt 2 i skissen ovenfor, og dempingene på 3 og 10 dB vi fant ut fra retningsdiagrammene, en avstand på 50 m, og ellers de andre oppgitte størrelsene, kan vi finne den maksimale strålingsintensiteten så enkelt som dette:

$$I_{max} = \frac{1.0 \text{ mW} \cdot 10^{(43 - 4 + 18 - 3 - 10)/10}}{4\pi(50 \text{ m})^2} = 0.80 \text{ mW/m}^2$$

Forskjellen mellom dette siste resultatet og det vi fant i stad er at vi i den omfattende prosedyren brukte 18.1 dBi forsterkningsfaktor, mens vi i den siste bare brukte 18 dBi.

#### 4

Vi vil nå bestemme de tilsvarende maksimale elektriske og magnetiske feltene (i betydning effektivverdier) beboerne i huset kan utsettes for. Vi kan f.eks. først finne det elektriske feltet  $E$  ved å bruke den velkjente relasjonen:

$$E_{eff}^2 = Z I_{eff}$$

der  $Z$  er impedansen til det tomme rom, og  $I$  er strålingsintensiteten (i kompendiet skrev vi

$E_{eff}^2 = Z P_{eff}$ ). Innsatt:

$$E_{eff} = \sqrt{376.7 \Omega \cdot 0.82 \text{ mW/m}^2} = 0.56 \text{ V/m}$$

Magnetfeltet kan finnes ved den enkle relasjonen:

$$H_{eff} = \frac{E_{eff}}{Z}$$

Innsatt:

$$H_{eff} = \frac{0.56 \text{ V/m}}{376.7 \Omega} = 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ A/m} = 1.5 \text{ mA/m}$$

Merk at vi vanligvis bruker  $H$  når vi skal angi magnetfelt for radiofrekvenser, selv om vi vanligvis bruker  $B$  for magnetfelt ved meget lave frekvenser, f.eks. 50 Hz.

#### 5

Ifølge maksimalverdiene for bestråling av den generelle befolkning, foreslått av International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP) i 1998, bør strålingsintensiteten (power density) ved 930 MHz ikke overstige:

$$I_{max} = 930/200 \text{ W/m}^2 = 4.65 \text{ W/m}^2$$

Merk at det i ICNIRP tabellene forutsettes at frekvensen gis i helt spesielle enheter, her i MHz.

Dette er en faktor  $4.65 \text{ W/m}^2 / 8.2 \cdot 10^{-4} \text{ W/m}^2 = 5670$  ganger strålingsintensiteten på det stedet i huset vi betrakter som hadde kraftigst stråling.

For elektrisk felt er verdien som foreslås av ICNIRP:

$$E_{max} = 1.375 \cdot \sqrt{930} \text{ V/m} = 42 \text{ V/m}$$

Dette er en faktor  $42 \text{ V/m} / 0.56 \text{ V/m} = 75$  ganger det vi forventer er maksimalverdien i vårt hus. Tilsvarende kan vi for magnetfeltet se at ICNIRP foreslår en maksimalverdi på:

$$H_{max} = 0.037 \cdot \sqrt{930} \text{ V/m} = 1.13 \text{ A/m}$$

Dette er en faktor  $1.13 \text{ A/m} / 1.5 \cdot 10^{-3} \text{ A/m} = 75$  ganger det vi beregnet for maksimalverdien av magnetfeltet fra basestasjonen, målt i huset. Det er selvfølgelig samme forholdstall enten en ser på elektrisk eller magnetisk felt, siden både vi og ICNIRP har forutsatt at vi er i fjernfeltsonen der det er en nøye relasjon mellom  $E$  og  $H$ .

Når vi vet at det allerede er lagt inn sikkerhetsmarginer i de foreslåtte grenseverdiene, er det klart at strålingen fra basestasjonen vi har betraktet er meget liten, selv i det nærmeste huset. Det betyr at det ikke er noe mulighet for at strålingen fra basestasjonen gir en nevneverdig oppvarming av vevet til et menneske som oppholder seg i huset.

Dette er på sett og vis ikke så rart når vi tenker på at utstrålt effekt var temmelig beskjeden. Selv med en antenneforsterkning på 18 dB over isotrop fordeling dersom vi er i hovedloopen, og demping på ca 13 dB siden vi ikke er i hovedloopen, så har vi bare netto 5 dB forsterkning framfor isotrop utstråling på det stedet i huset med mest stråling. Dersom vi, mot anbefalingene ovenfor, legger til disse 5 dB-ene til utstrålt effekt, kommer vi opp i 25 W tilsynelatende utstrålt effekt, isotropt fordelt. Og det er ikke sannsynlig at et menneske blir nevneverdig oppvarmet av en 25 W lyspære som er plassert bortimot 50 m unna!

Hvorvidt mikrobølgene fra antennen kan ha en "ikke-termisk effekt" er et annet spørsmål. Hittil har vi altså alt for få holdepunkter til å stole på rapporterte biologiske effekter også ved lavere strålingsintensiteter enn dem som gir oppvarming. Hva fremtiden vil bringe er det vel ingen som vet.

\*\*\*

Finner du feil i løsningsforslaget, eller ønsker å kontakte meg for videre spørsmål etc, kan du bruke:

*Snail mail:* A.I.Vistnes, Fysisk institutt, Universitetet i Oslo, Boks 1048, Blindern, 0316 Oslo

*E-mail:* a.i.vistnes@fys.uio.no

*Tel/fax:* 22855646 / 22855671