



Nya modeller för vågutbredning över mark

Jämförelse med GRWAVE

PETER HOLM OCH BÖRJE ASP

FOI är en huvudsakligen uppdragsfinansierad myndighet under Försvarsdepartementet. Kärnverksamheten är forskning, metod- och teknikutveckling till nytta för försvar och säkerhet. Organisationen har cirka 1000 anställda varav ungefär 800 är forskare. Detta gör organisationen till Sveriges största forskningsinstitut. FOI ger kunderna tillgång till ledande expertis inom ett stort antal tillämpningsområden såsom säkerhetspolitiska studier och analyser inom försvar och säkerhet, bedömning av olika typer av hot, system för ledning och hantering av kriser, skydd mot och hantering av farliga ämnen, IT-säkerhet och nya sensorers möjligheter.



FOI
Totalförsvarets forskningsinstitut
Ledningssystem
Box 1165
581 11 Linköping

Tel: 013-37 80 00
Fax: 013-37 81 00

www.foi.se

FOI-R--2564--SE Teknisk rapport
ISSN 1650-1942 Augusti 2008

Ledningssystem

Peter Holm och Börje Asp

Nya modeller för vågutbredning över mark

Jämförelse med GRWAVE

| | |
|---|---|
| Titel | Nya modeller för vågutbredning över mark. Jämförelse med GRWAVE |
| Title | Some new ground wave models Comparison with GRWAVE |
| Rapportnr/Report no | FOI-R--2564--SE |
| Rapporttyp Report Type | Teknisk rapport Technical report |
| Sidor/Pages | 30 p |
| Månad/Month | Augusti |
| Utgivningsår/Year | 2008 |
| ISSN | ISSN 1650-1942 |
| Kund/Customer | FMV |
| Forskningsområde Programme area | 7. Ledning med MSI 7. C4I |
| Delområde Subcategory | 71 Ledning 71 Command, Control, Communications, Computers, Intelligence |
| Projektnr/Project no | E7314 |
| Godkänd av/Approved by | Kia Wiklund |
| FOI, Totalförsvarets Forskningsinstitut Avdelningen för Ledningssystem Box 1165 581 11 Linköping | FOI , Swedish Defence Research Agency Command and Control Systems SE-581 11 Linköping |

Sammanfattning

Inom projektet Detvag90 FAS II har tre nya markvågsmodeller utvecklats. Modellerna är tänkta att användas i de applikationer som använder beräkningskärnan Detvag90. Drivande för utvecklingen har varit ett uttalat behov av beräkningseffektivare modeller för tillämpningsapplikationerna WRAP och TCT. I Detvag90 används markvågsmodellen GRWAVE som har god giltighet men som är relativt beräkningsintensiv. I Detvag90 ingår även snabb men enkel markvågsmodell med begränsad giltighet, exempelvis beträffande antennhöjder.

I tillämpningarna WRAP eller TCT blir dagens implementation av GRWAVE extra beräkningsintensiv då de funktioner som finns inbyggda i Detvag90 beräkningskärna för att spara delresultat av olika skäl inte kan användas.

Detta utvecklingsarbete har gått ut på att skapa en ny modell med avsevärt kortare beräkningstider men med i stort sett oförändrad giltighet relativt GRWAVE.

Den första modellen är en plan jordmodell. Denna modell kan hantera höga antennhöjder men är inte giltig för stora avstånd. Den andra är en förenklad sfärisk jordmodell. Den är relativt beräkningseffektiv samtidigt som den är giltig i ett större område än de plana jordmodellerna. Den tredje är en sfärisk jordmodell som i stort sett ska vara giltig i hela området, dvs giltig för både låga och höga antenner samt stora avstånd.

Nyckelord: Radiovågsutbredning, markvågsmodell, GRWAVE

Summary

Within the project "Detvag FAS II", three new ground wave models have been developed. The models are intended to be used by applications using the Detvag90 calculation engine. The main reason for a further development of the Detvag90 program is a request of more computational efficient models for use in the applications WRAP and TCT. In Detvag90, the well known ground wave model GRWAVE is used for calculation of the transmission loss over smooth spherical earth. This model is accurate but computational intensive. Detvag90 includes also a fast model for smooth spherical earth. Unfortunately, this model is less accurate and limited to low antenna heights.

Many quantities computed by the program GRWAVE only need to be calculated once when calculating many transmission loss values along a radius outwards from the transmitter. When calculating transmission losses for point-to-point, these quantities have to be recalculated for every point-to-point calculation. This fact makes the use of GRWAVE more computation intensive for point-to-point than for coverage calculations along several radii. Unfortunately, by different reasons, the applications WRAP and TCT are based on point-to-point calculations also for coverage calculations.

Consequently, the purpose of this work has been to develop a new model doing the same kind of calculations as GRWAVE but in a more computation efficient way. The outcome of this effort resulted in three new models.

The first one is a plane earth model, which is able to handle large antenna heights but is limited to short distances. The second model is a simplified spherical earth model, which is fast and able to handle distances larger than the new plane earth model. The third model is a spherical earth model, which, more or less, is valid for any set of input parameters; that is, no restrictions on antenna heights, propagation distance, etc.

Keywords: Radio wave propagation, ground wave model, GRWAVE.

Innehållsförteckning

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | Inledning | 7 |
| 2 | Ny plan jordmodell | 8 |
| 3 | Förenklad sfärisk jordmodell | 11 |
| 4 | Ny sfärisk jordmodell | 19 |
| 4.1 | Resultat för måttliga till långa avstånd | 20 |
| 4.2 | Resultat för mycket långa avstånd..... | 26 |
| 5 | Sammanfattning | 29 |
| 6 | Referenser | 30 |

1 Inledning

Inom projektet Detvag90 FAS II har under vintern 2007/2008 tre nya markvågsmodeller utvecklats på FOI. Modellerna är tänkta att användas i de applikationer som använder beräkningskärnan Detvag90. Drivande för utvecklingen har varit ett uttalat behov av beräkningseffektivare modeller för de applikationer som inom FM använder Detvag90, fn WRAP och TCT.

En täckningsberäkning, dvs en beräkning där de beräknade värdena talar om vilken signalstyrka som kan förväntas i olika terrängavsnitt, genererar en stor mängd beräkningar. Är området som man önskar täcka in stort, en cirkel med radien 10-20 km är här inte ovanligt, kan antalet beräkningpunkter vara så många som 50000 (eller till och med fler). Om modellerna inte är beräkningseffektiva blir det mycket långa och i vissa fall helt orimliga beräkningstider. I Detvag90 används markvågsmodellen GRWAVE som har god giltighet men som är relativt beräkningsintensiv. I Detvag90 ingår även en mycket enkel markvågsmodell med begränsad giltighet, exempelvis beträffande antennhöjder.

I tillämpningarna WRAP eller TCT blir dagens implementation av GRWAVE extra beräkningsintensiv då de funktioner som finns inbyggda i Detvag90 beräkningskärna för att spara delresultat av olika skäl inte kan användas i dessa tillämpningar. I sämsta fall används därför mindre noggranna beräkningsmodeller för att komma ner i rimliga tider, något som då kan äventyra resultatets totala giltighet.

Detta utvecklingsarbete har gått ut på att skapa en ny modell med avsevärt kortare beräkningstider men med i stort sett oförändrad giltighet relativt GRWAVE.

Tre delmodeller har skapats. Den första modellen är en plan jordmodell. Denna modell kan hantera höga antennhöjder, vilket inte den nuvarande enkla plana jordmodellen i Detvag90 gör. Denna är, liksom den nuvarande, inte giltig för stora avstånd. Den nya modellen ger dock mycket bra resultat för korta avstånd. Den andra är en förenklad sfärisk jordmodell. Den är relativt beräkningseffektiv samtidigt som den är giltig i ett större område än de plana jordmodellerna. Den tredje är en sfärisk jordmodell som i stort sett ska vara giltig i hela området, dvs giltig för både låga och höga antenner samt stora avstånd.

2 Ny plan jordmodell

Den nya plana jordmodellen är baserad på Norton's vågutbredningslösning för en dipol ovan plan mark [1]. Denna lösning är giltig för alla höjder så länge jorden kan anses vara plan. Ett villkor för när jorden kan anses vara plan kan man finna i en rapport av Åke Blomquist [2]. Här ges det maximala avståndet av villkoret $d < 12 \times 10^3 \lambda^{1/3}$, där avståndet d och våglängden λ anges i meter. Detta villkor ger följande maximala avstånd; 8 km för 1000 MHz, 12 km för 300 MHz, 17.3 km för 100 MHz, 25.9 km för 30 MHz, 37.3 km för 10 MHz, 55.7 km för 3 MHz, 80.3 km för 1 MHz och 120 km för 0.3 MHz. De valda frekvenserna är här de som har använts i jämförelserna med GRWAVE [3]; se figur 1-8.

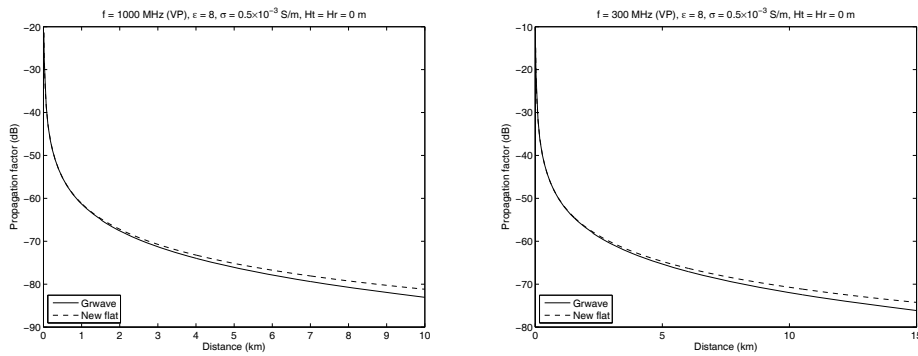
Ser man till resultaten i figur 1-8 är villkoret ovan något optimistiskt. I referens [4] anger man gränsen $d < 5 \times 10^3 \lambda^{1/3}$ för att felet inte ska överstiga 10 %. Ett fel på 10 % i fältstyrka motsvarar ungefär 0.8-0.9 dB. En kontroll ger vid handen att det verkar stämma med gränsen $d < 5 \times 10^3 \lambda^{1/3}$. Ett fel på 11-12 % skulle ge ett fel på ca 1 dB. Om vi accepterar ett fel på 1 dB, fås villkoret:

$$d < 8 \times 10^3 \lambda^{1/3}. \quad (1)$$

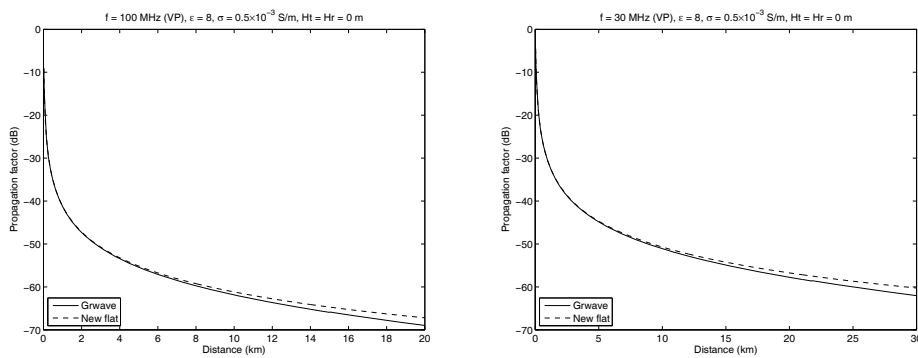
Detta senare villkor ger följande maximala avstånd; 5.36 km för 1000 MHz, 8 km för 300 MHz, 11.54 km för 100 MHz, 17.24 km för 30 MHz, 24.86 km för 10 MHz, 37.13 km för 3 MHz, 53.55 km för 1 MHz och 80 km för 0.3 MHz. Håller man sig inom dessa avstånd ska felet inte vara större än 1 dB, förutom när man befinner sig i interferenszonen. Här kan felet bli större, vilket beror på att interferensminima hamnar något annorlunda för en sfärisk yta än för en plan. På grund av att signalstyrkan minskar dramatiskt när man är på väg ned i ett minimum kan det reella felet bli betydligt större än 1 dB. Detta får man leva med eftersom giltighetsområdet annars skulle bli relativt begränsat.

Beräkningstiderna för den nya plana jordmodellen är mycket korta i relation till GRWAVE. För nio frekvenser (0.3, 1, 3, 10, 30, 100, 300, 1000, 3000 MHz) och 5000 beräkningspunkter längs en 100 km lång sträcka för varje frekvens, dvs totalt 45000 beräkningspunkter, var den nya modellen ungefär 290 gånger snabbare än GRWAVE. (Antennhöjderna var för övrigt 50 och 1,5 m.) Den snabbaste modellen i Detvag90 är en plan jordmodell med en liten korrektion för sfärisk jord. Vid en jämförelse med denna var beräkningstiden för den nya modellen ungefär 20 % mindre, vilket är en förbättring men försumbart i slutändan. Om sträckans längd minskas till 25 km, men med samma antal beräkningspunkter etc., fås att den nya modellen är ungefär 270 gånger snabbare än GRWAVE och ungefär 20 % kortare beräkningstid än den snabbaste modellen i Detvag90. Sträckans längd har således ingen större betydelse i det här fallet.

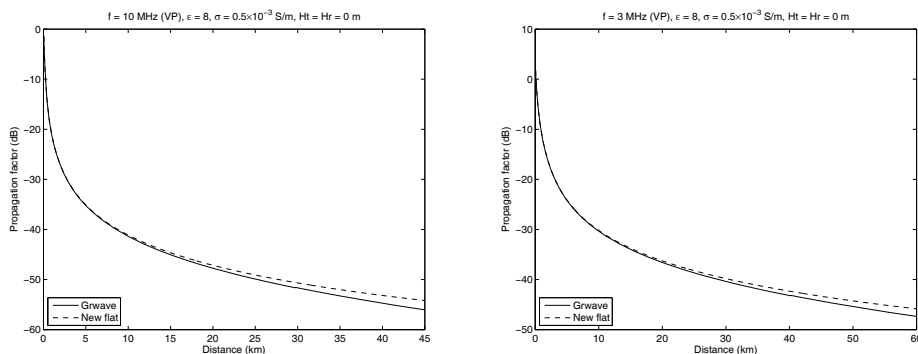
Vårt att notera är att GRWAVE inte alltid ger bra resultat; se resultatet för frekvens 0.3 MHz i figur 8. Orsaken är att GRWAVE använt geometrisk optik till att börja med och sedan, ungefär vid avståndet 23 km, övergått till en så kallad utvidgad plan jordmodell. GRWAVE borde ha bytt till den senare modellen betydligt tidigare. Det är förmodligen möjligt att ändra en del på villkoren som styr metodvalet i programkoden. För tillfället kommer dock programkoden till GRWAVE inte att ändras.



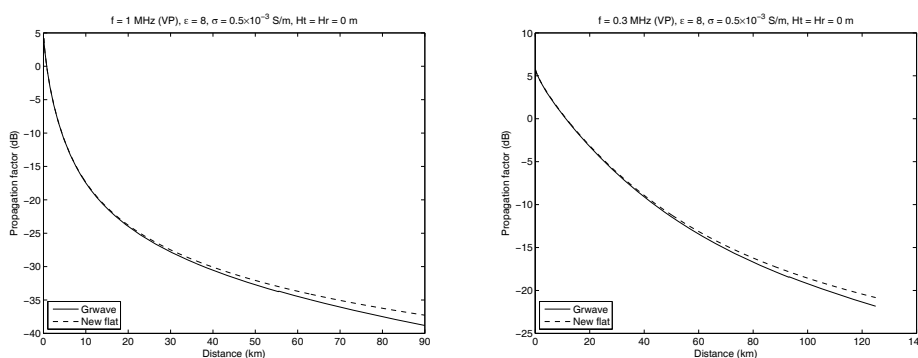
Figur 1 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 1000 och 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 m.



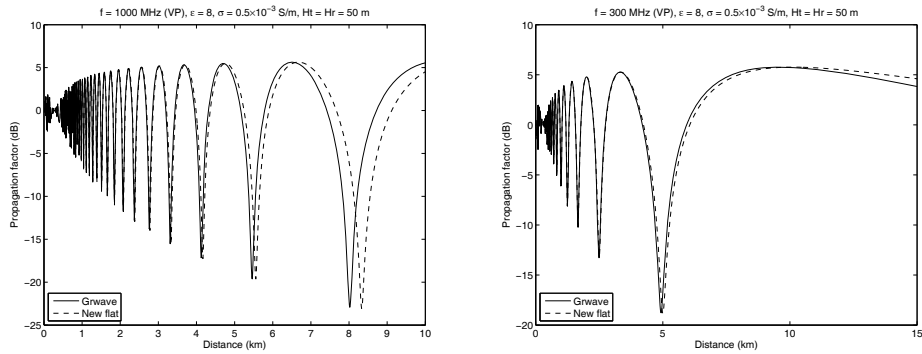
Figur 2 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 100 och 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 m.



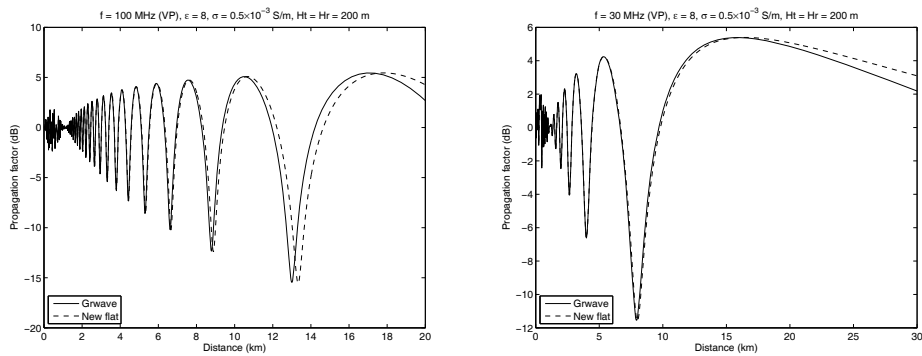
Figur 3 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 10 och 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 m.



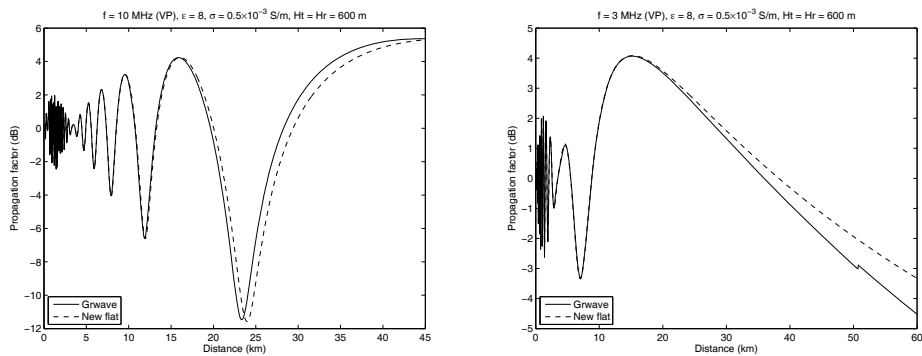
Figur 4 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 1 och 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 m.



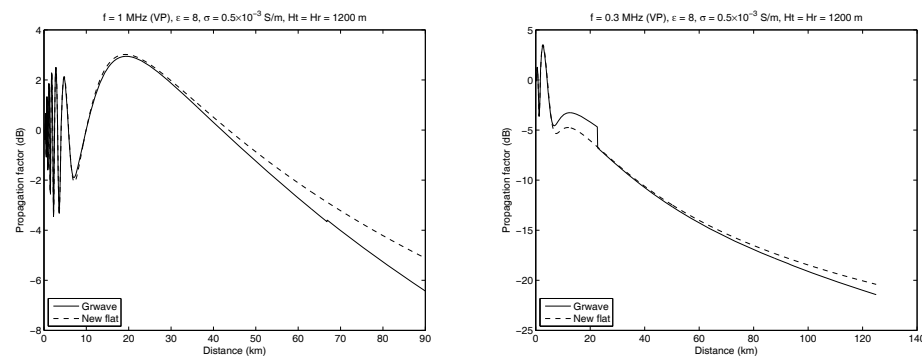
Figur 5 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 1000 och 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 50 m.



Figur 6 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 100 och 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 200 m.



Figur 7 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 10 och 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 600 m.



Figur 8 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya plana jordmodellen för frekvenserna 1 och 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 1200 m.

3 Förenklad sfärisk jordmodell

Den nya förenklade sfäriska jordmodellen är baserad på vanlig geometrisk optik och Norton's vågutbredningslösning för plan mark med en korrektion för sfärisk jord. Modellen bygger på att det exponentiella höjdberoendet för brytningsindex kan lineariseras. Effekten av en lineariserad brytningsindexprofil är dock beroende av avståndet, varför det användbara höjdområdet blir avståndsberoende. För korta avstånd kan man tillåta mycket höga antennhöjder, ett par tusen meter. Hänsyn till brytningsindex i det linjära området sker genom att jordradien korrigeras via den så kallade jordradiefaktorn. För mycket höga höjder (flera tusen meter) måste man dock ta hänsyn till att brytningsindex avtar exponentiellt med höjden (vilket GRWAVE gör). Det ända vågutbredningsfall där detta skulle vara nödvändigt är egentligen bara vid kommunikation till och från flygplan, vilket inte är Detvag90:s största användningsområde. Vi ska återkomma litet mer till det exponentiella brytningsindexet i kapitel 4.

Resultat för den nya förenklade sfäriska modellen kan ses i figur 9-32. Figurerna visar utbredningsfaktor som funktion av avståndet för ett antal olika antennhöjder och frekvenser. Notera att det visade avståndsintervallet ökas med minskande frekvens. Det man till att börja med kan se är att GRWAVE och den nya förenklade sfäriska modellen stämmer bra överens för korta avstånd. Detta är förväntat eftersom GRWAVE här använder en sfärisk geometrisk optisk modell när det är möjligt. I vissa fall skiljer sig dock modellerna åt, vilket är som mest tydligt för höga antennhöjder och stora avstånd innan båda modellerna byter beräkningsmetod. För det mesta syns hopp i kurvorna när modellerna byter beräkningsmetod. Hoppen i den nya modellen beror på att den inte använder sig av en så kallad residyserie för stora avstånd, utan endast en plan jordmodell korrigerad för sfärisk jord. Hoppen eller felen fås således när den byter till denna metod. För GRWAVE ligger felet i den geometriska optiska metoden. Denna använder sig inte av en divergensfaktor för sfärisk jord, vilket egentligen är lätt att åtgärda. Att en divergensfaktor måste användas beror på att en stråle som har reflekterats mot en sfärisk yta får en större divergens efter reflektionen. Används en divergensfaktor multipliceras reflektionskoefficienten med denna. Hoppen fås således i detta fall när den byter från en mer felaktig metod till residyserien med ett mindre fel.

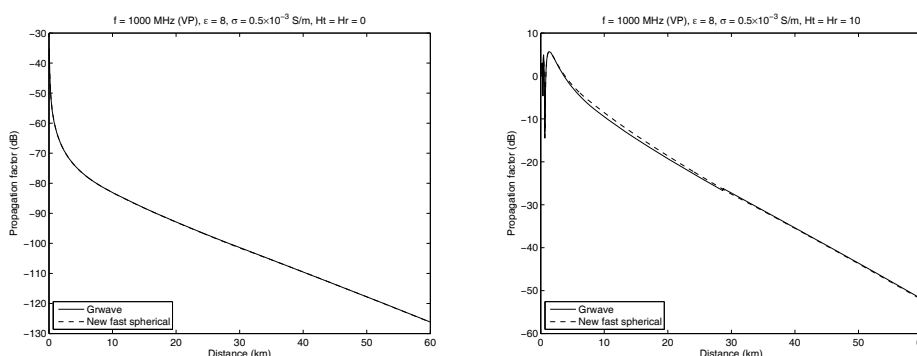
När både GRWAVE och den nya modellen byter beräkningsmetod fås således hopp i kurvorna. I GRWAVE-fallet är de relativt små. Om den geometriska optiska modellen i GRWAVE använde sig av en sfärisk divergensfaktor skulle dessa hopp vara ännu mindre. När den nya modellen byter metod övergår den till att använda den plana jordmodellen som beskrivits i avsnitt 2, men med en korrektion för sfärisk jord. Det är denna modell som tyvärr inte går att använda för hur höga antenner som helst. Det är möjligt att det går att prova ut en bättre korrektion för höga höjder än den som för tillfället används. För höjden noll fungerar modellen alldeles utmärkt, men för denna höjd finns det teoretiskt stöd för hur korrektionen ska se ut [1]. För höjder skiljda från noll blir det betydligt svårare. Det finns åtminstone tre parametrar som korrektionen måste bero på, höjden (egentligen två höjder, en för sändaren och för mottagaren), frekvensen och avståndet. Har man tre parametrar att ta hänsyn till är det inte helt trivialt att se sambandet. Den korrektion som vi har tagit fram för höjder skiljda från noll är en "trial and error" lösning

som utökar användningsområdet för den korrigerade plana jordmodellen tillräckligt för att den ska kunna gå att använda för höjder på upp till ett tiotal meter.

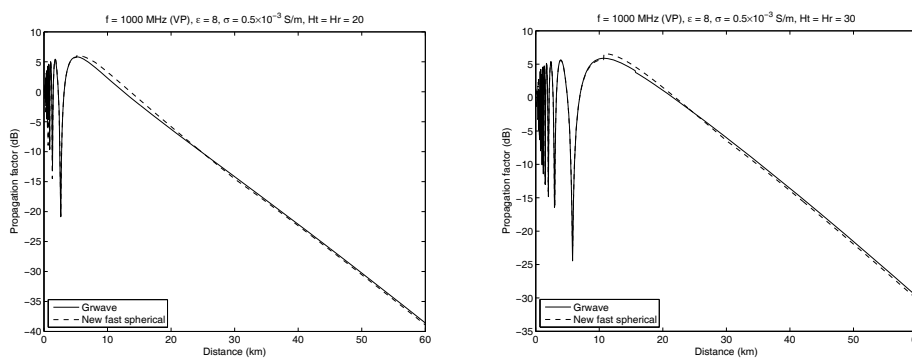
För att försöka bedöma när den korrigerade plana jordmodellen fungerar kan man titta på höjden $\lambda(R/\lambda)^{1/3}$, där R är jordradien. För höjder mindre än denna börjar geometrisk optik att bli mindre tillförlitlig emedan andra effekter såsom ytvågen blir allt mer betydelsefull [3]. Efter att ha studerat resultaten i figur 9-32 har vi kommit fram till att villkoret

$$h_t + h_r < \lambda(R/\lambda)^{1/3}, \tag{2}$$

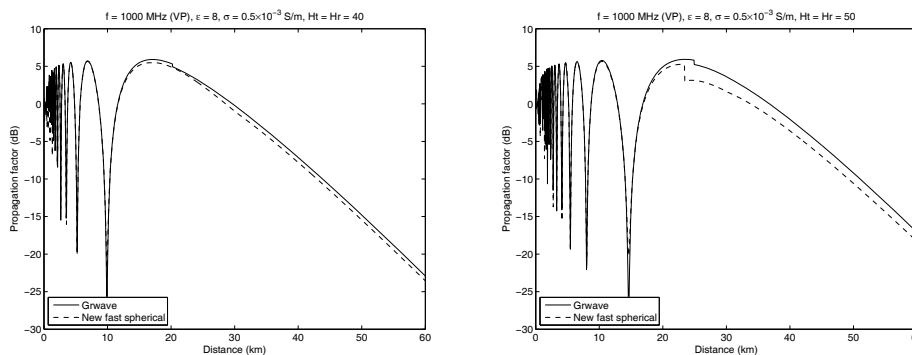
där h_t är sändarhöjden och h_r mottagarhöjden, inte ger större fel än ungefär 1 dB för den förenklade sfäriska modellen.



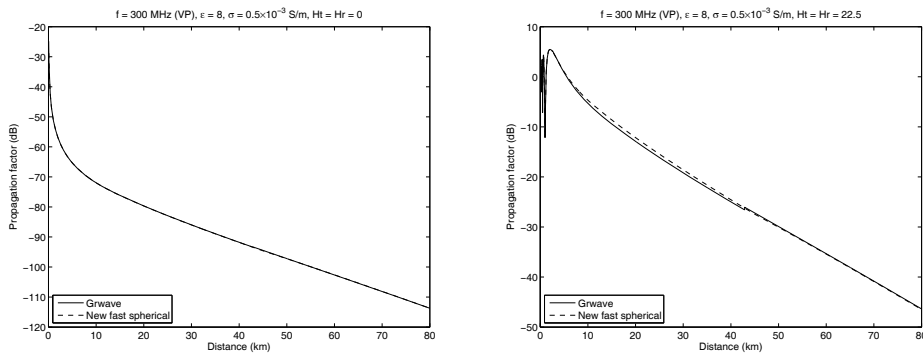
Figur 9 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 1000 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 10 m.



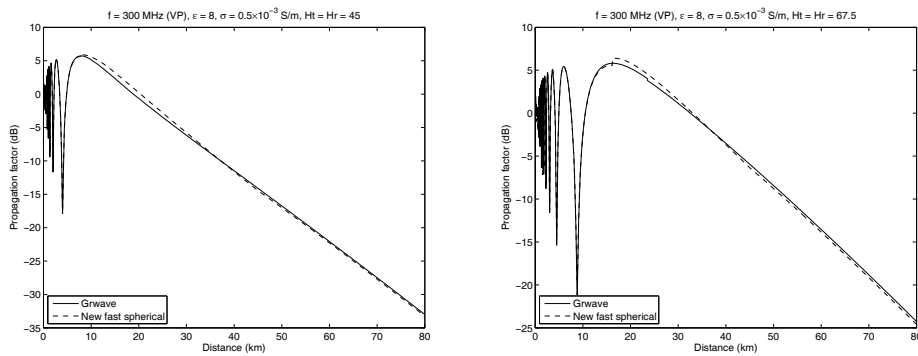
Figur 10 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 1000 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 20 respektive 30 m.



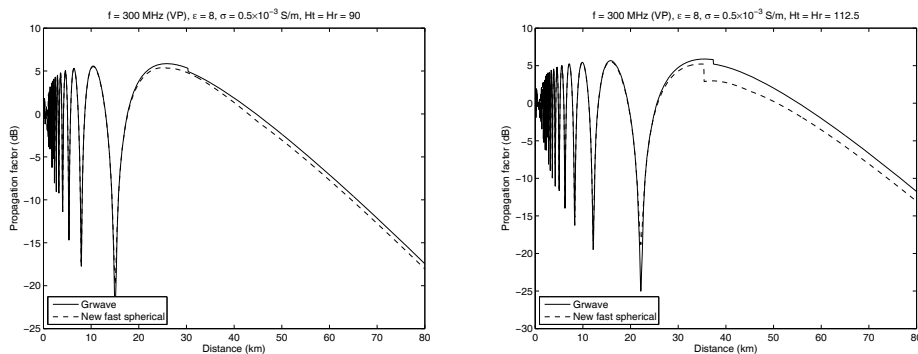
Figur 11 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 1000 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 40 respektive 50 m.



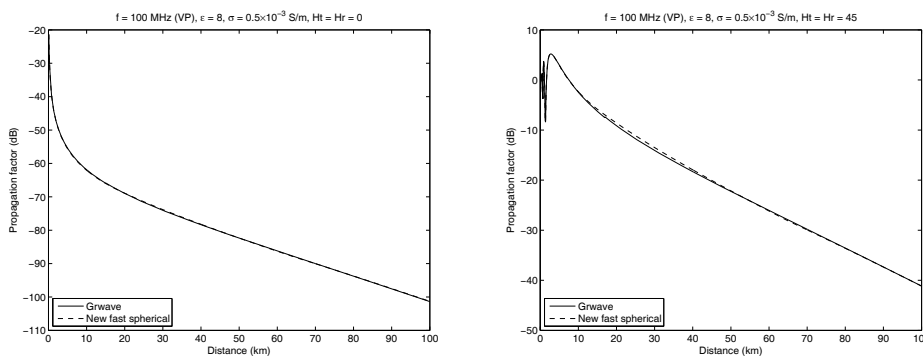
Figur 12 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 22.5 m.



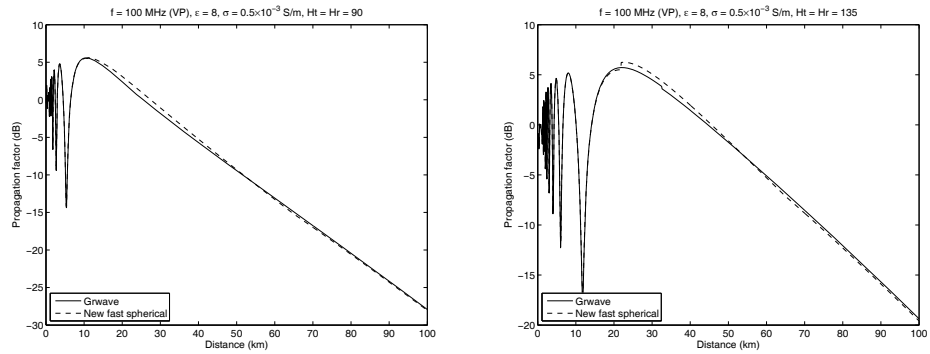
Figur 13 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 45 respektive 67.5 m.



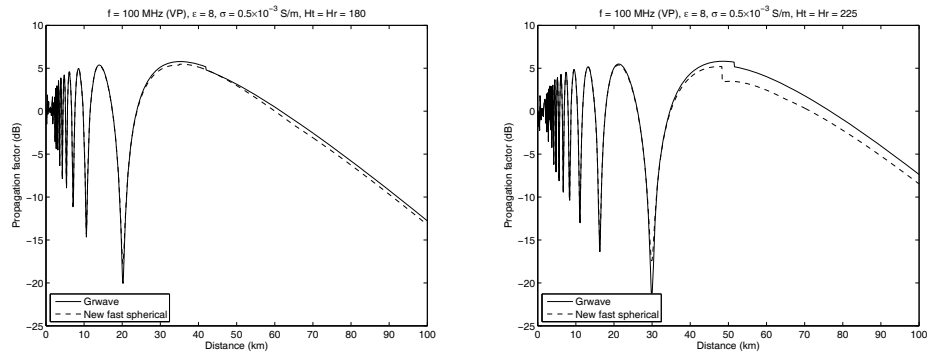
Figur 14 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 90 respektive 112.5 m.



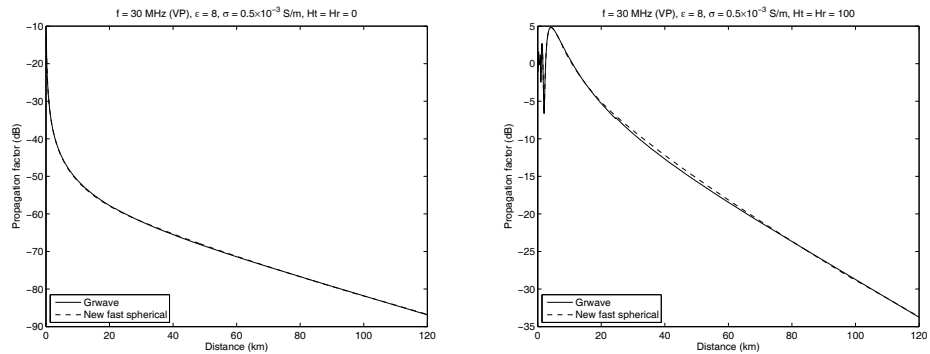
Figur 15 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 45 m.



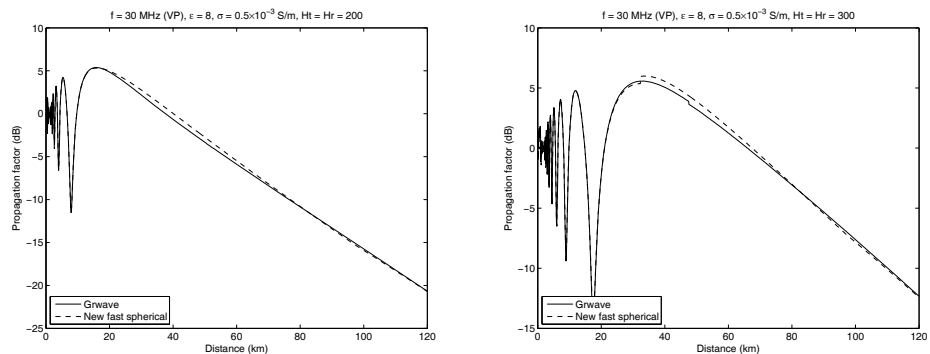
Figur 16 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 90 respektive 135 m.



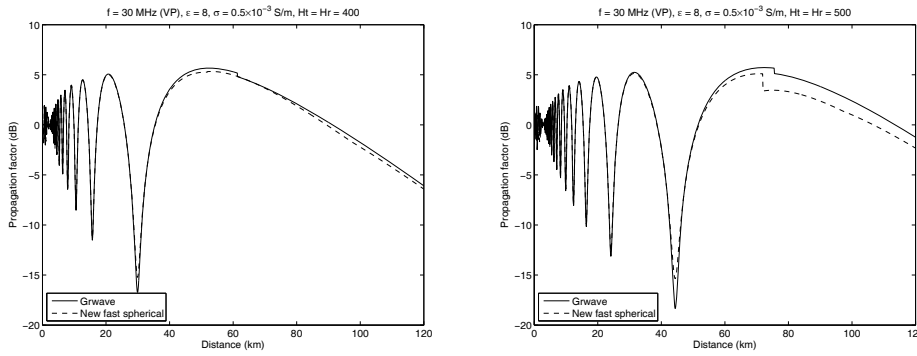
Figur 17 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 180 respektive 225 m.



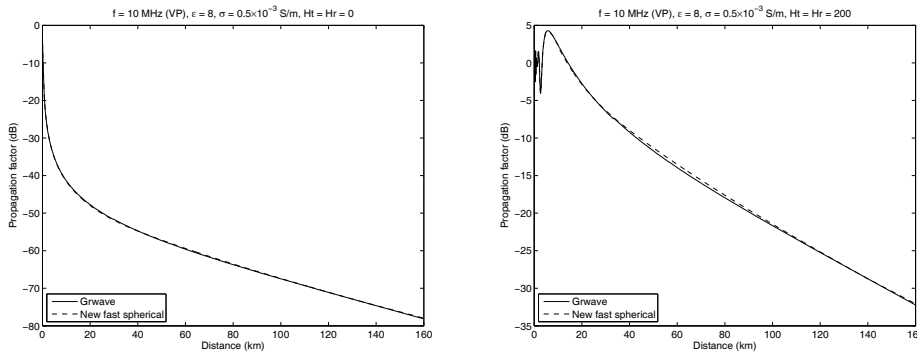
Figur 18 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 100 m.



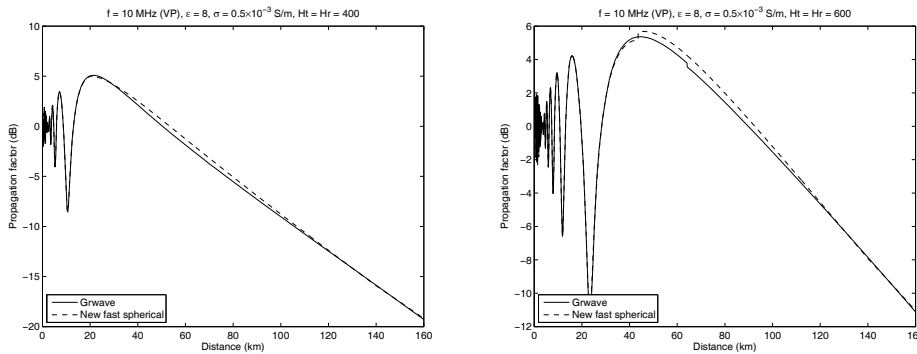
Figur 19 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 200 respektive 300 m



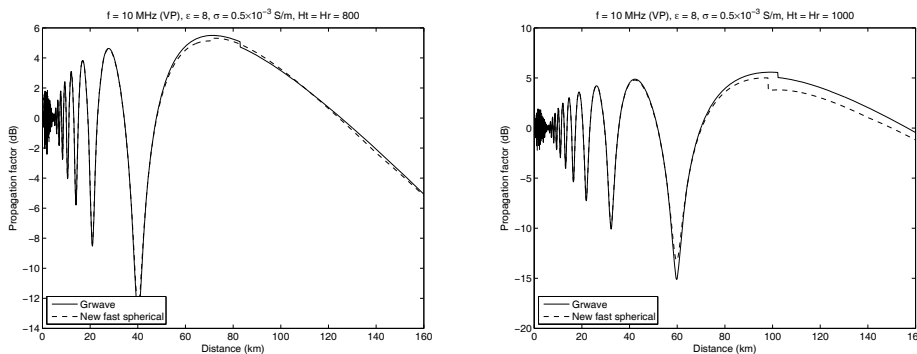
Figur 20 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 400 respektive 500 m



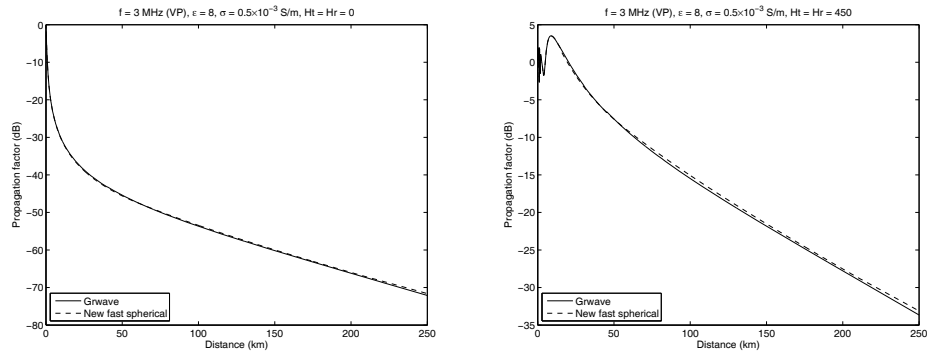
Figur 21 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 200 m.



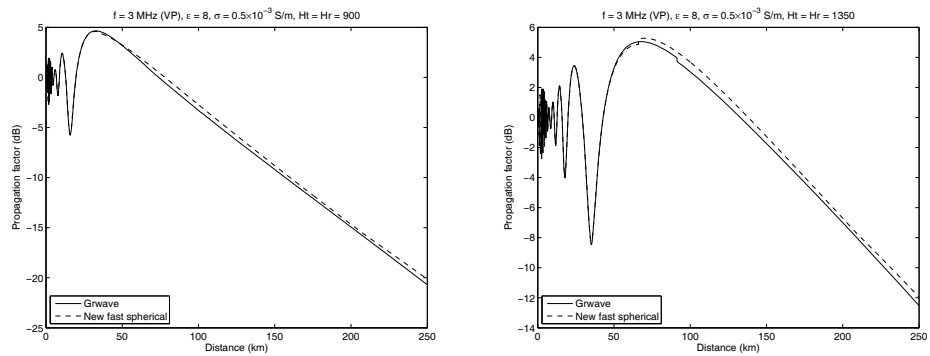
Figur 22 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 400 respektive 600 m.



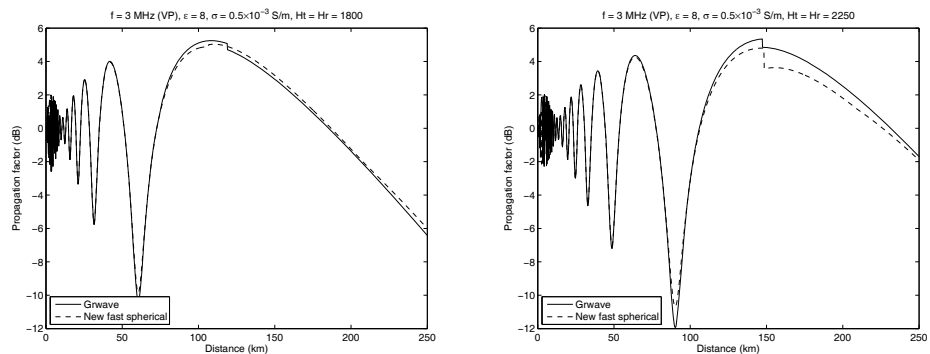
Figur 23 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 800 respektive 1000 m.



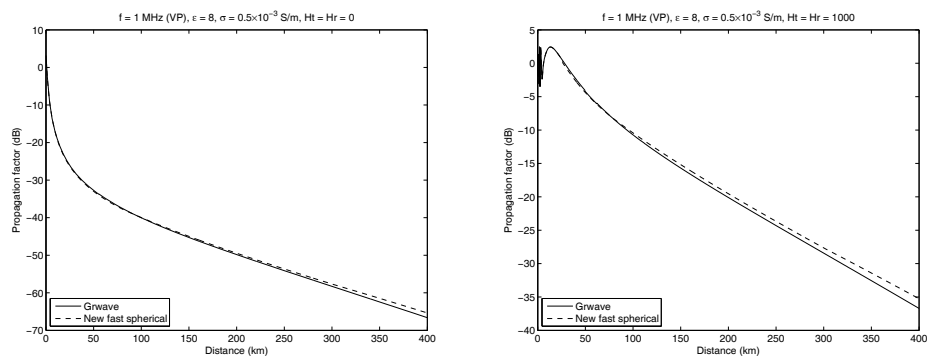
Figur 24 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 450 m.



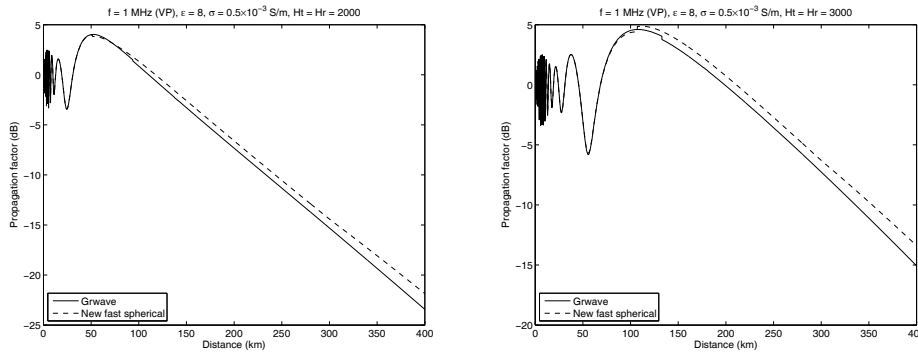
Figur 25 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 900 respektive 1350 m.



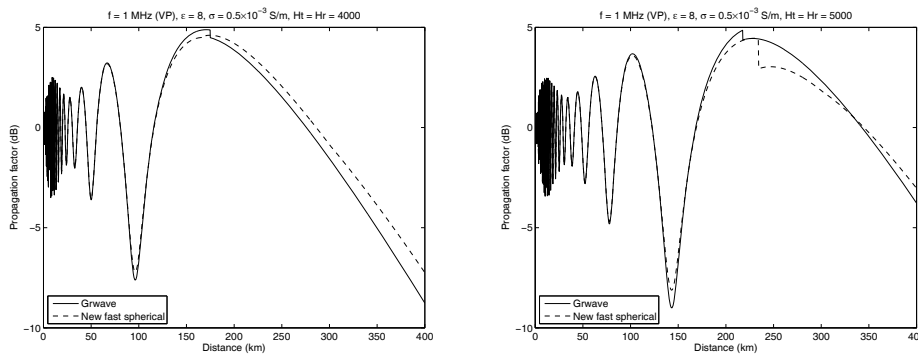
Figur 26 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 1800 respektive 2250 m.



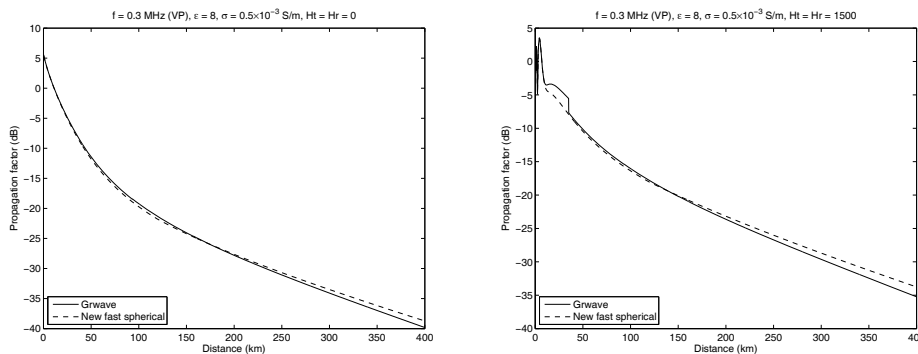
Figur 27 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 1000 m.



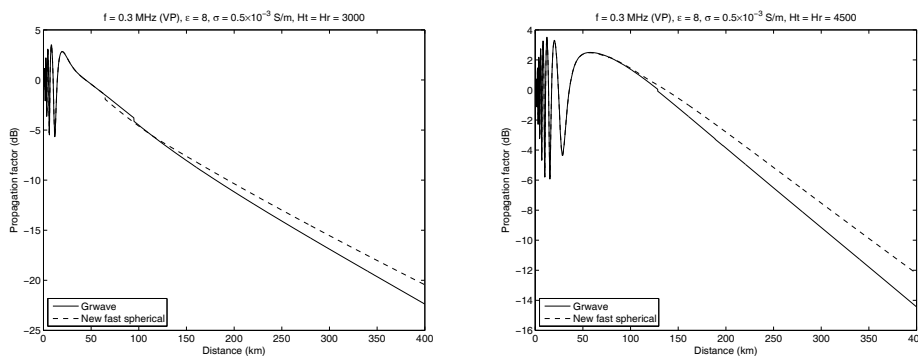
Figur 28 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 2000 respektive 3000 m.



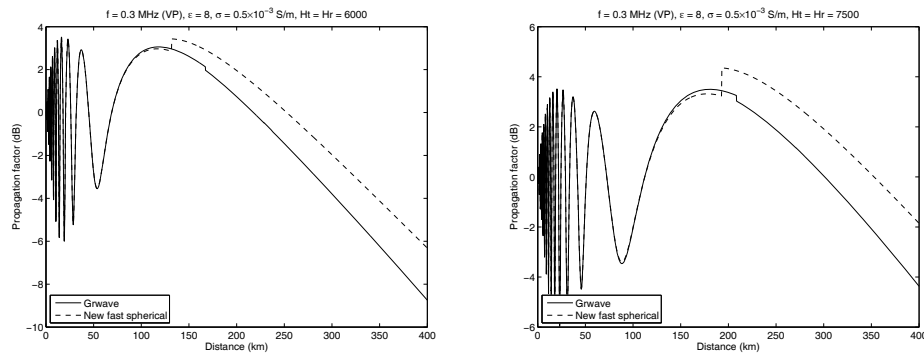
Figur 29 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 4000 respektive 5000 m.



Figur 30 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 1500 m.



Figur 31 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 3000 respektive 4500 m.



Figur 32 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya förenklade sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 6000 respektive 7500 m.

Ekvation (2) ger för frekvensen 1000 MHz att summan av antennhöjderna ska vara mindre än 91 m, för 300 MHz 204 m, för 100 MHz 424 m, för 30 MHz 947m, för 10 MHz 1970 m, för 3 MHz 4396 m, för 1 MHz 9143 m och för 0.3 MHz 20403 m. För frekvensen 0.3 MHz är vi inte i närheten av gränshöjden 20403 m, men redan innan har vi ett fel som överstiger 1 dB; se figur 32. Orsaken till detta är inte bara att korrigeringen till den plana jordmodellen inte fungerar. Det finns andra orsaker som vi ska komma till i nästa avsnitt. Anmärkning: Resultaten i figur 9-32 och resultaten från ekvation (2) är för normalatmosfär, dvs jordradien (6.37×10^6 m) har multiplicerats med jordradiefaktorn för normalatmosfär (4/3).

Om vi multiplicerar höjderna ovan med 1/2 får vi höjden 45,5 m för 1000 MHz, 102 m för 300 MHz, 212 m för 100 MHz, 473,5 m för 30 MHz, 985 m för 10 MHz, 2198 m för 3 MHz och 4571,5 m för 1 MHz. För h_t och h_r lika med dessa höjder bör resultatet hamna ungefär mitt emellan resultaten i de två sista figurerna för varje frekvens. Detta indikerar att om ekvation (2) är uppfylld bör inte felet vara större än 1 dB, eftersom felet i den näst sista figuren för varje frekvens (utom för frekvensen 0.3 MHz) är mindre än 1 dB och något större i den sista. Frekvensen 0.3 MHz har vi utelämnat, eftersom vi har konstaterat att ekvation (2) inte gäller för frekvenser under ungefär 1 MHz.

Om antennhöjderna skulle uppfylla $h_t + h_r > \lambda(R/\lambda)^{1/3}$ innebär detta inte att den nya förenklade sfäriska modellen inte fungerar, vilket också framgår av resultaten i figur 9-32. För korta avstånd är den förenklade modellen i stort sett alltid giltig. Det finns faktiskt ett villkor för när den nya modellen alltid fungerar och det är när geometrisk optik är giltig, vilket den är så länge gångskillnaden mellan direkt- och den markreflekterade strålen är $> \lambda/4$. Tyvärr måste denna gångskillnad räknas numeriskt för en sfärisk markyta, vilket också görs i den nya förenklade modellen för att veta när man ska byta beräkningsmetod. Vi kan följaktligen inte ställa upp ett enkelt villkor för detta. För en plan jordyta gäller dock att avståndet approximativt bör vara mindre än $8h_t h_r / \lambda$. För en sfärisk yta är detta avstånd tyvärr mindre. Hur mycket varierar med avstånd, sändarhöjd och mottagarhöjd.

Till sist några ord om beräkningstiderna. För precis samma beräkningsfall och antal beräkningspunkter som för den plana jordmodellen i avsnitt 2 visar sig den förenklade sfäriska modellen vara 280 och 260 gånger snabbare än GRWAVE för 100 respektive 25 km:s sträckan. Den visar sig även vara något snabbare än den snabbaste modellen i Detvag90, ungefär 16 % kortare beräkningstid för både 100 och 25 km.

4 Ny sfärisk jordmodell

Den nya sfäriska jordmodellen är baserad på geometrisk optik, Nortons vågutbredningslösning för plan mark med en korrektion för sfärisk jord [1]-[2], den utvidgade plana jordmodellen av Rotheram [3] och en residyserie. Här har vi bytt ut den residyserie som används i GRWAVE mot en residyserie utvecklad av Wait [5]. Denna är i stort sett lika bra som den i GRWAVE, men betydligt mindre beräkningskrävande. För frekvenser under 1 MHz börjar den dock bli mindre tillförlitlig. Anledningen till att den blir mindre tillförlitlig under 1 MHz är att den, liksom den förenklade sfäriska modellen i föregående avsnitt, inte tar hänsyn till ett exponentiellt brytningsindex. Modellen är således bara giltig inom brytningsindexets linjära område där hänsyn tas till gradienten via en jordradiefaktor (normalt 4/3), vilket innebär att modellen inte är giltig för hur höga antenner som helst. Antagandet att brytningsindex är linjärt orsakade de stora felen som kunde noteras i avsnitt 3 för de lägre frekvenserna vid höga antenner och stora avstånd; se figur 28-32. Även resultaten för den mer exakta sfäriska modellen i detta avsnitt uppvisar fel för de lägre frekvenserna vid höga antenner och stora avstånd; se figur 52-56. Felen är dock mindre i detta fall.

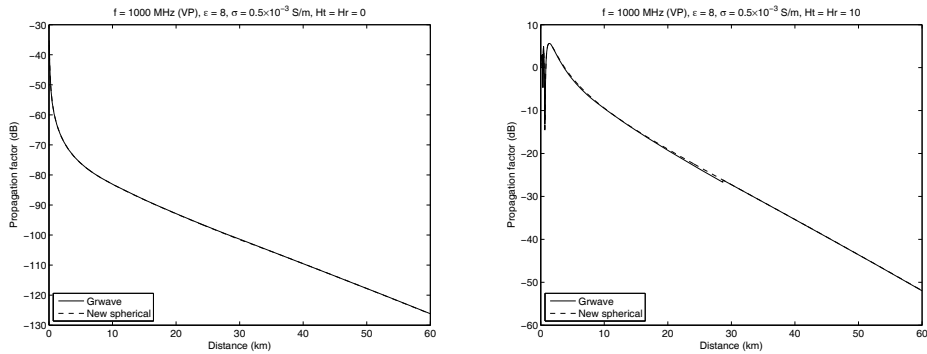
Under rubrik 4.1, där bara kurvorna är sammanställda, visas resultat för samma beräkningsfall som i 3, men här för den nya sfäriska jordmodellen istället för den förenklade. Resultatet är mycket bra i stort sett ända ned till 10 MHz; se figur 33-47. Vid 3 MHz börjar resultatet bli något sämre, men är fortfarande helt godkänt. Vid 1 MHz kan man få fel som är större än 1 dB. Positivt är dock att felen uppstår först för så höga höjder och stora avstånd att de inte är särskilt realistiska.

I kapitel 4.2, där också bara kurvorna är sammanställda, visas resultat för mycket långa avstånd. För frekvensen 100 MHz ger modellerna en mycket liten utbredningsfaktor, dvs en signalstyrka som skulle vara helt omöjlig att detektera i en mottagare. Intressant här är dock att den nya sfäriska modellen i stort sett ger samma resultat som GRWAVE även vid dessa långa avstånd.

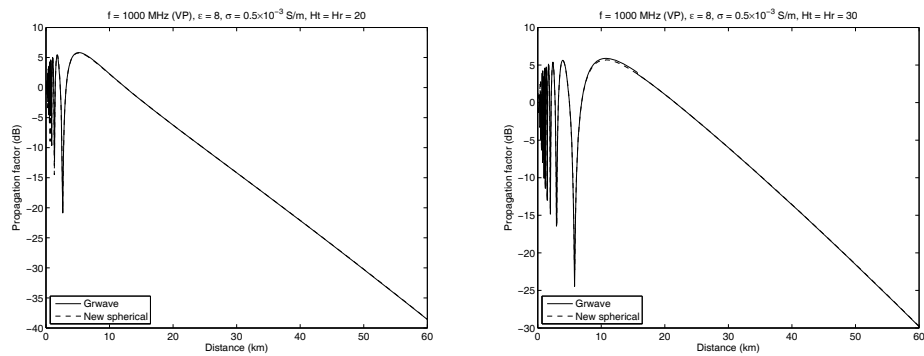
Den nya sfäriska modellen har uppenbarligen sina begränsningar, men för realistiska värden på frekvens, antennerhöjder och avstånd har de inte någon nämnvärd betydelse. För övrigt finns det möjligheter att förbättra modellen. Det finns en parameter i residyserien av Wait [5] som skulle kunna gå att förbättra, dvs så att den tar hänsyn till ett exponentiellt brytningsindex. Denna måste dock lösas numeriskt, vilket kommer att resultera i längre beräkningstider. Motsvarande parameter finns även i GRWAVE, där den beräknas numeriskt. Det finns fler storheter i GRWAVE som beräknas numeriskt, men de tester som har gjorts pekar på att det skulle räcka med att beräkna den aktuella parametern numeriskt, dvs man skulle inte behöva lösa fullt så många parametrar numeriskt som GRWAVE gör och ändå kunna få ett bra resultat på kortare tid. För tillfället är detta dock en uppgift för framtiden.

Vi har egentligen redan antytt att den nya sfäriska modellen är snabbare än GRWAVE. För samma testfall som i avsnitt 2 och 3 visade sig den nya sfäriska modellen vara 30 och 50 gånger snabbare än GRWAVE för 100 respektive 25 km:s sträckan, men ungefär 7,5 och 4,5 gånger långsammare än den snabbaste modellen i Detvag90 för 100 km:s respektive 25 km:s sträckan. Med tanke på resultaten i figur 33-68 är det mycket bra.

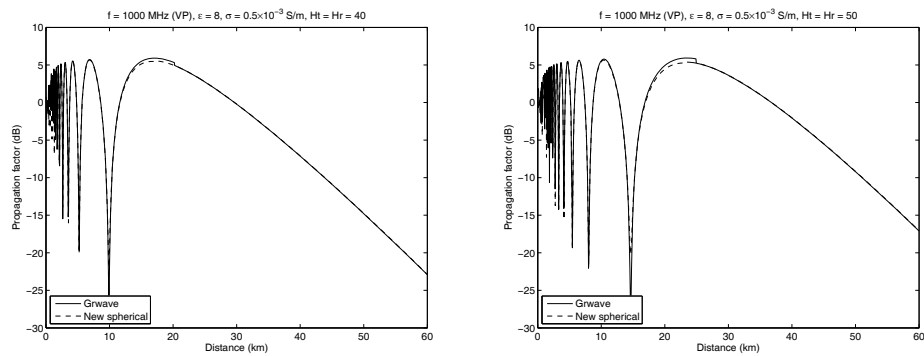
4.1 Resultat för måttliga till långa avstånd



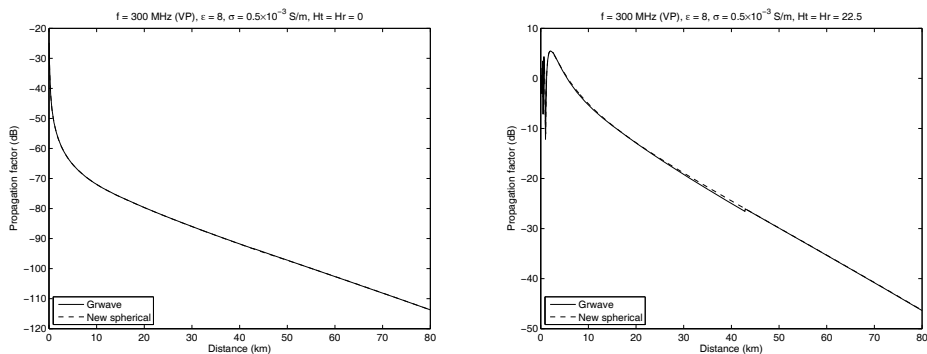
Figur 33 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1000 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 10 m.



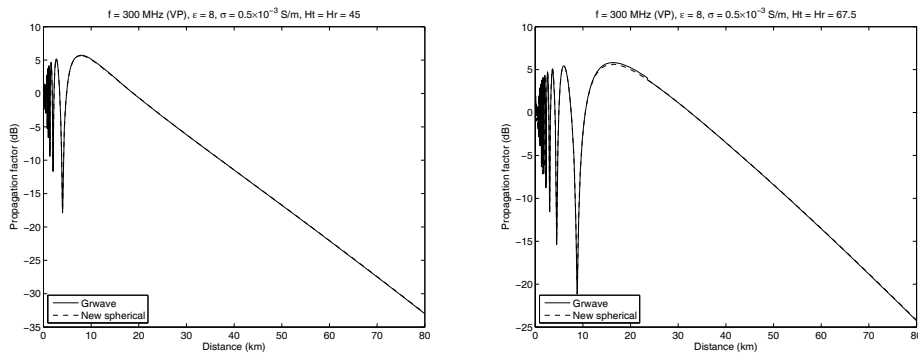
Figur 34 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1000 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 20 respektive 30 m.



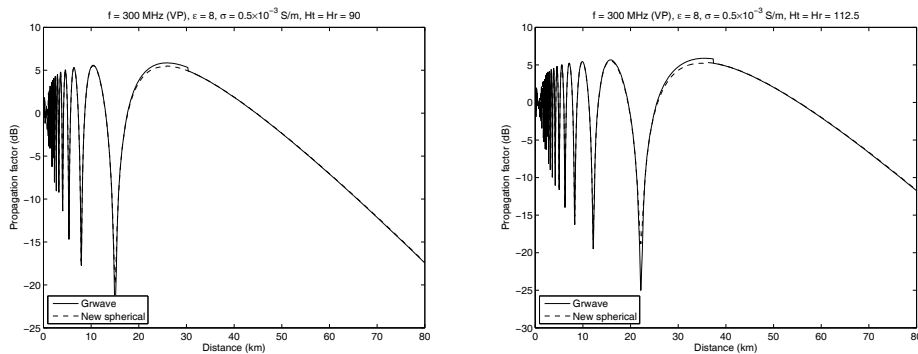
Figur 35 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1000 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 40 respektive 50 m.



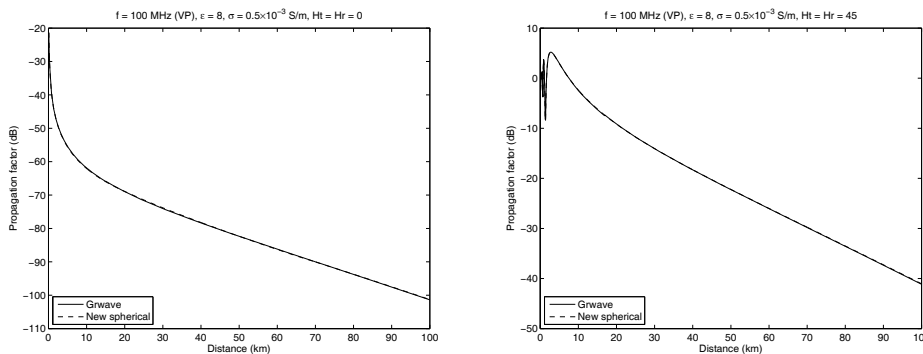
Figur 36 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 22.5 m.



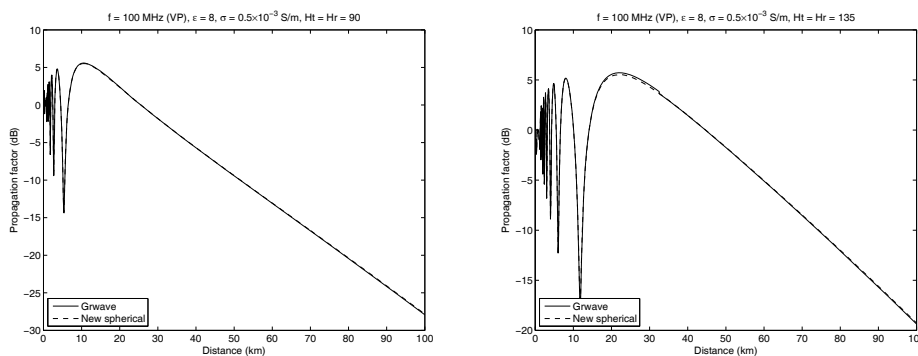
Figur 37 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 45 respektive 67.5 m.



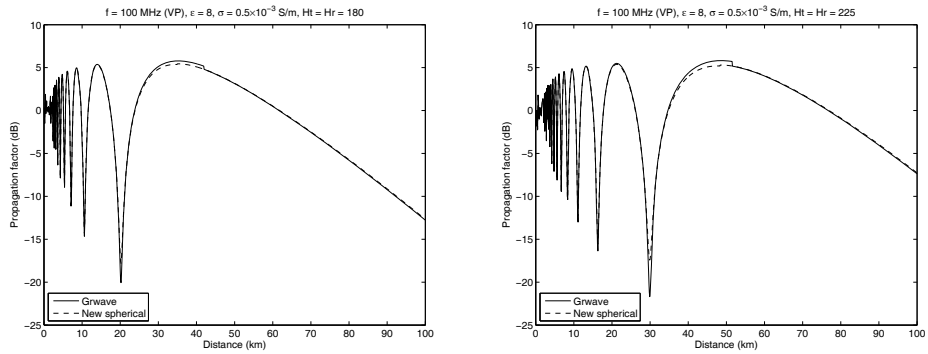
Figur 38 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 300 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 90 respektive 112.5 m.



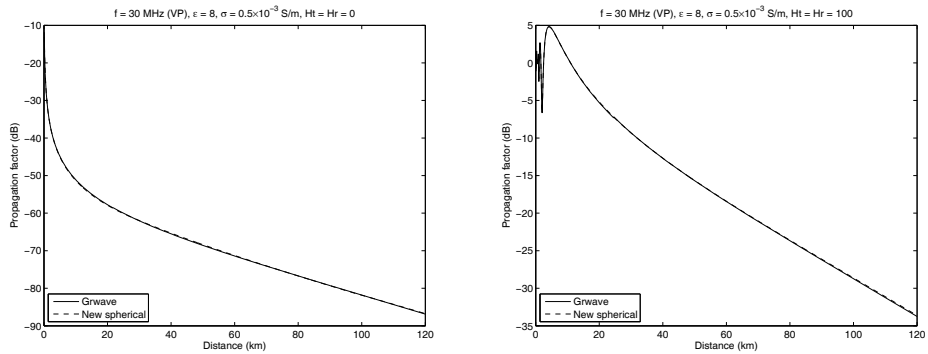
Figur 39 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 45 m.



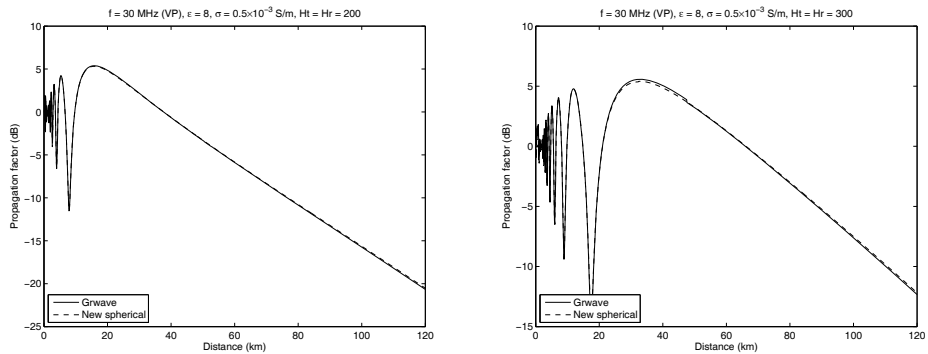
Figur 40 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 90 respektive 135 m.



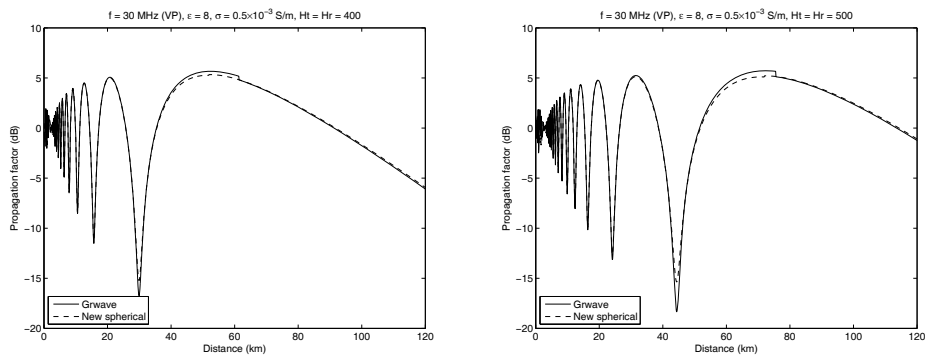
Figur 41 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 180 respektive 225 m.



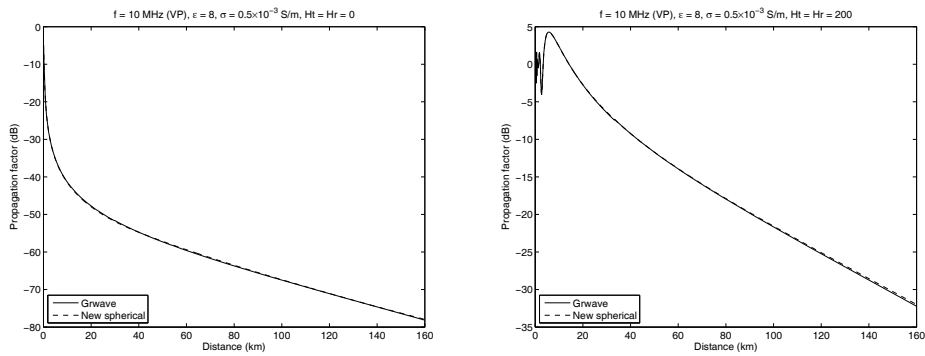
Figur 42 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 100 m.



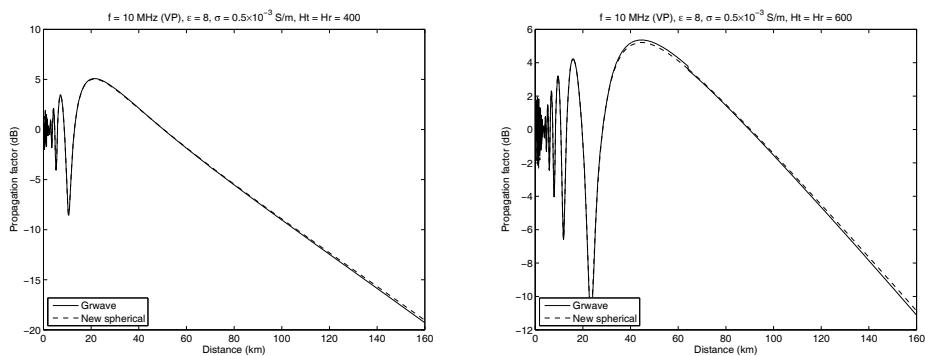
Figur 43 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 200 respektive 300 m.



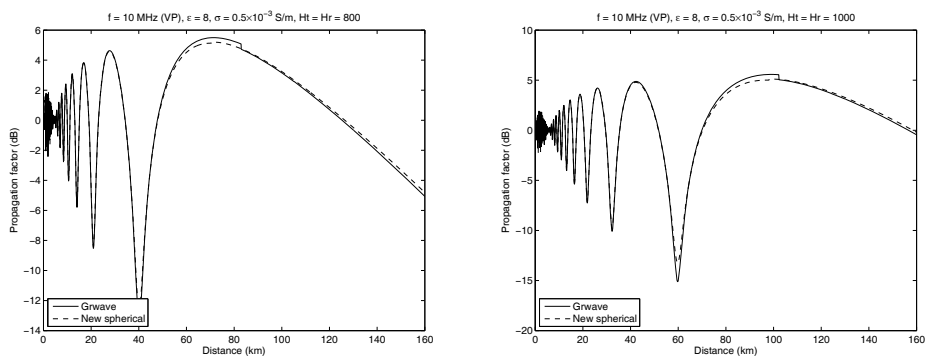
Figur 44 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 400 respektive 500 m.



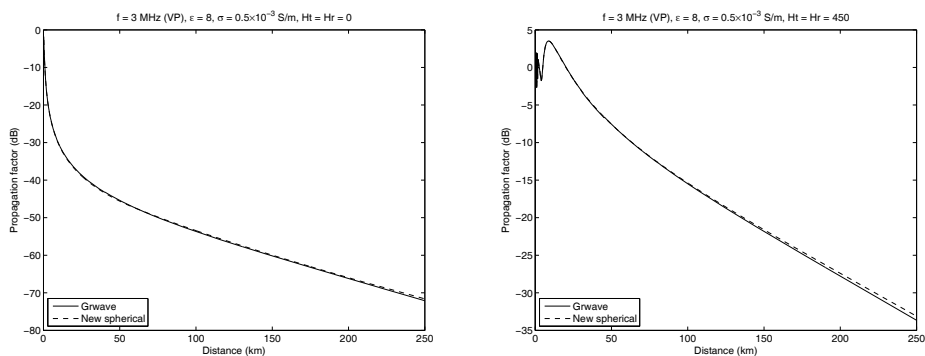
Figur 45 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 200 m.



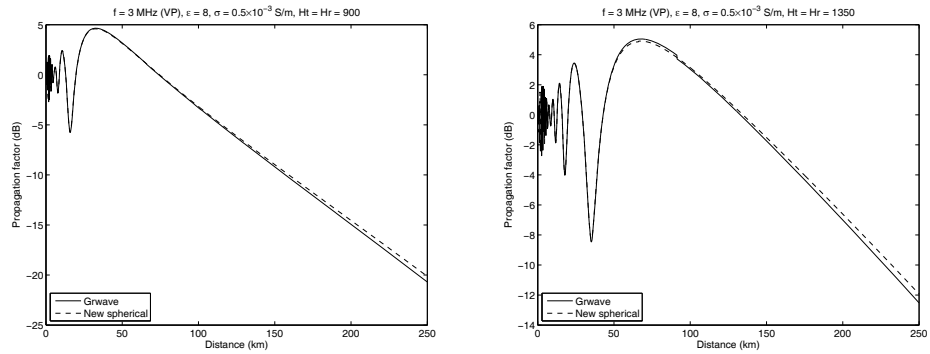
Figur 46 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 400 respektive 600 m.



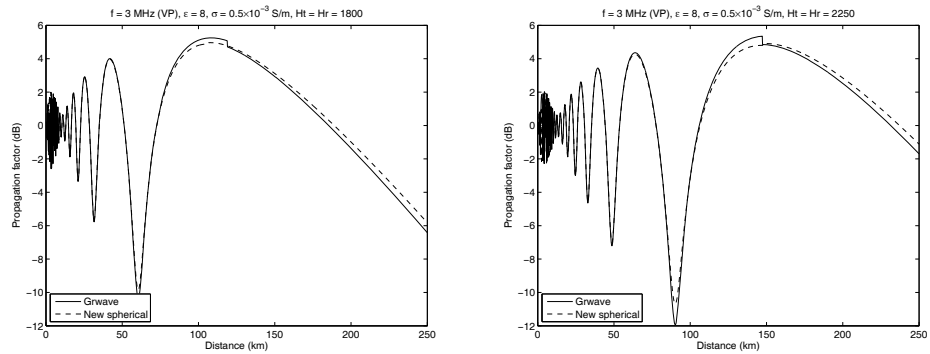
Figur 47 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 800 respektive 1000 m.



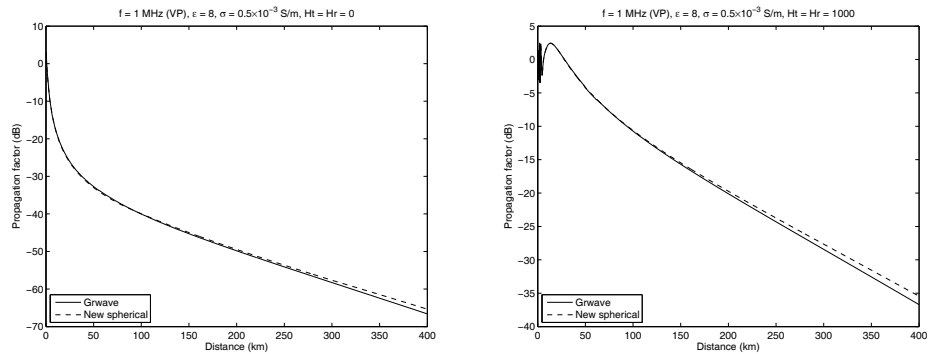
Figur 48 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 450 m.



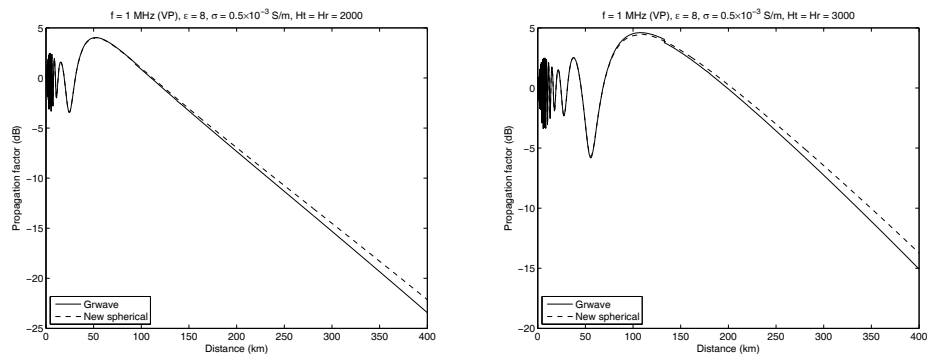
Figur 49 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 900 respektive 1350 m.



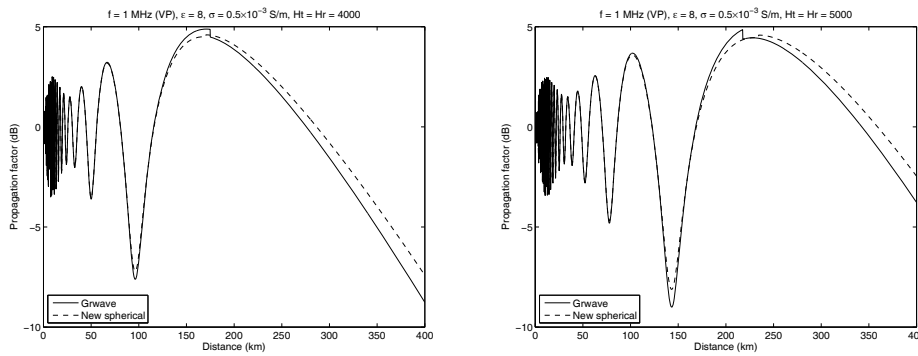
Figur 50 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 1800 respektive 2250 m.



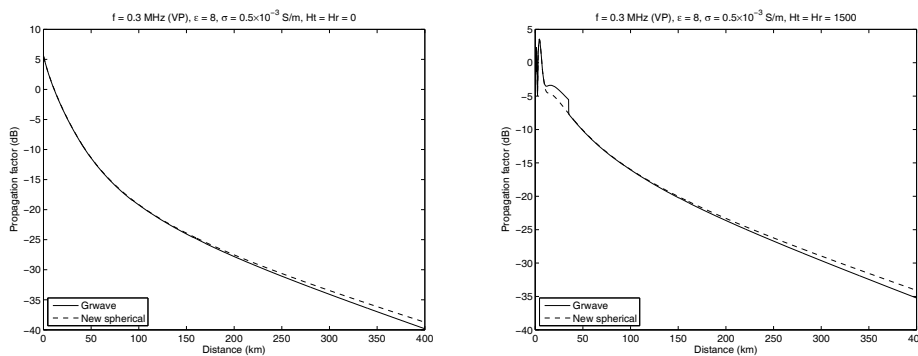
Figur 51 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 1000 m.



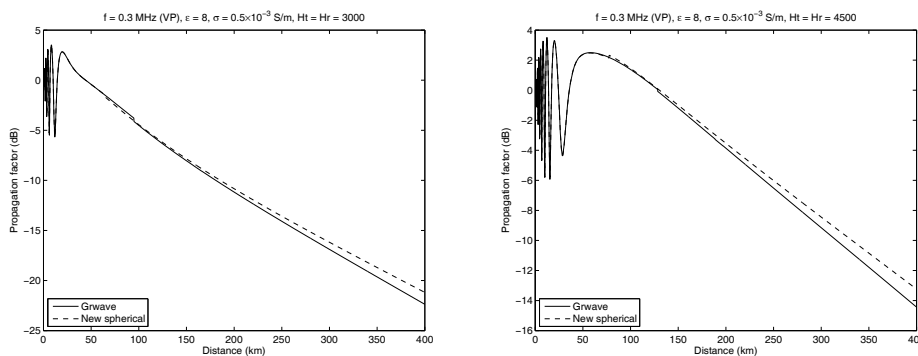
Figur 52 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 2000 respektive 3000 m.



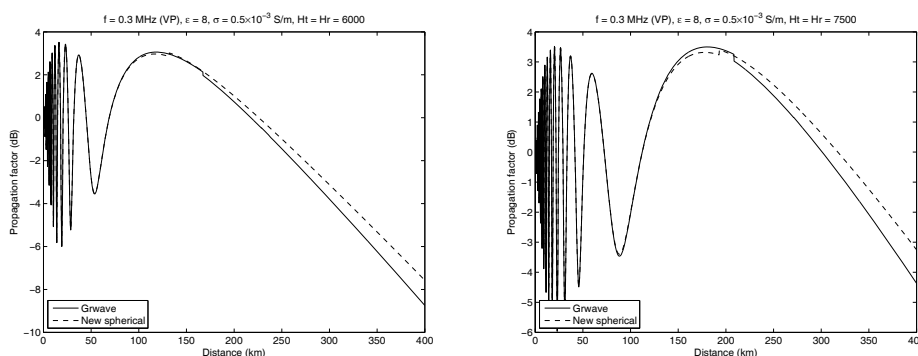
Figur 53 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 4000 respektive 5000 m.



Figur 54 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 1500 m.

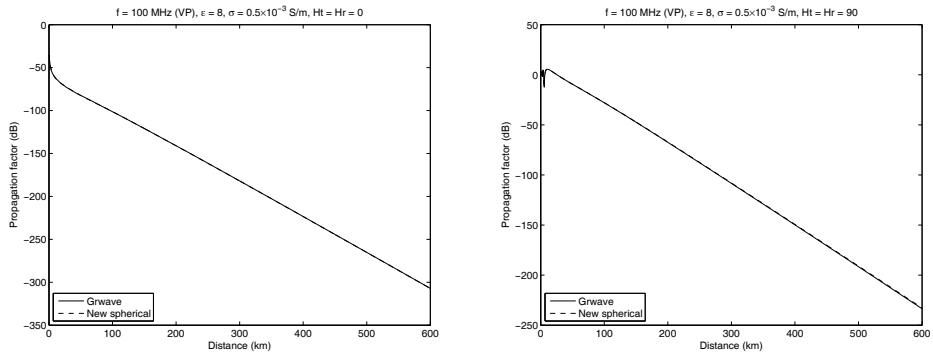


Figur 55 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 3000 respektive 4500 m.

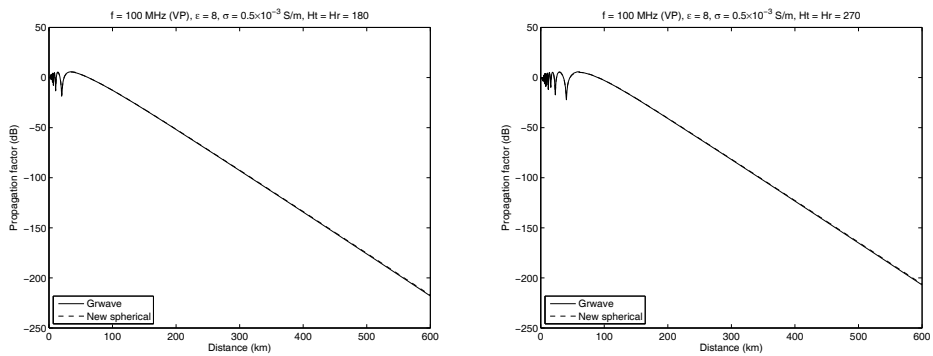


Figur 56 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 6000 respektive 7500 m.

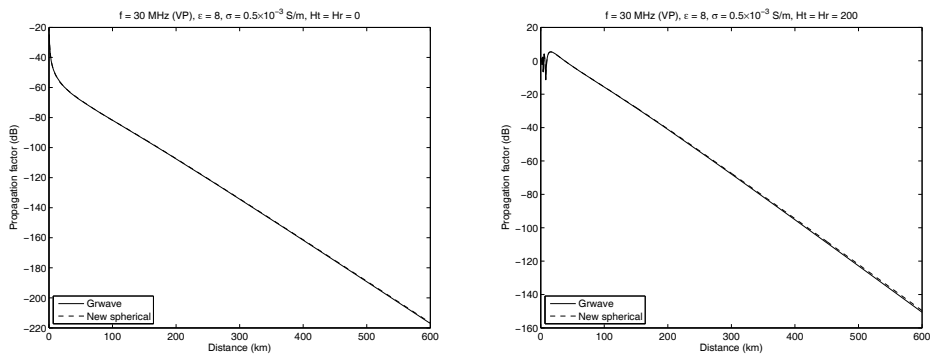
4.2 Resultat för mycket långa avstånd



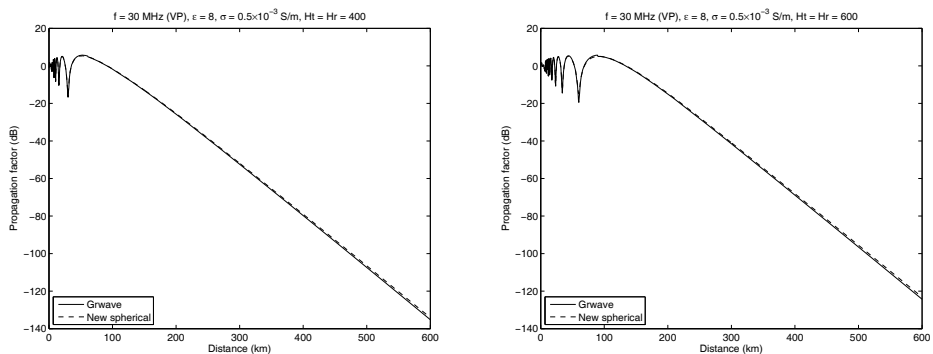
Figur 57 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 90 m.



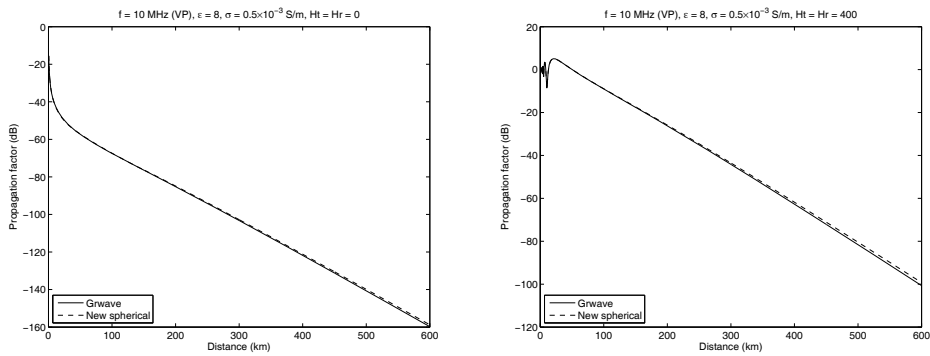
Figur 58 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 100 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 180 respektive 270 m.



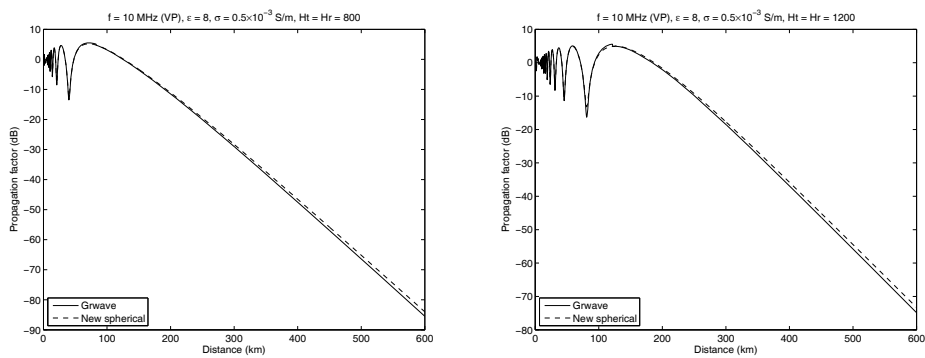
Figur 59 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 200 m.



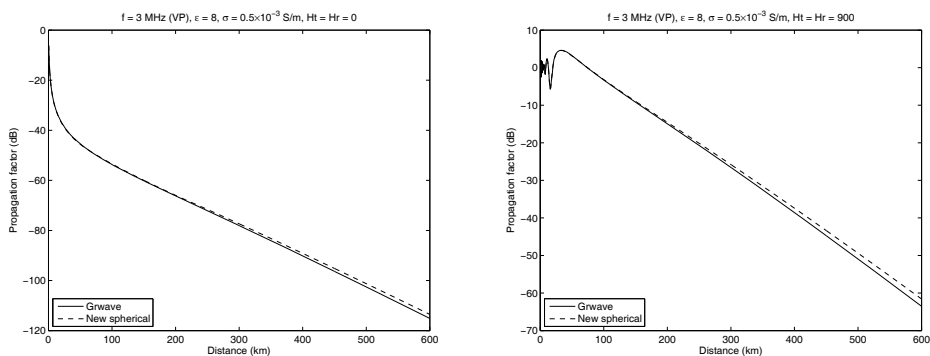
Figur 60 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 30 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 400 respektive 600 m.



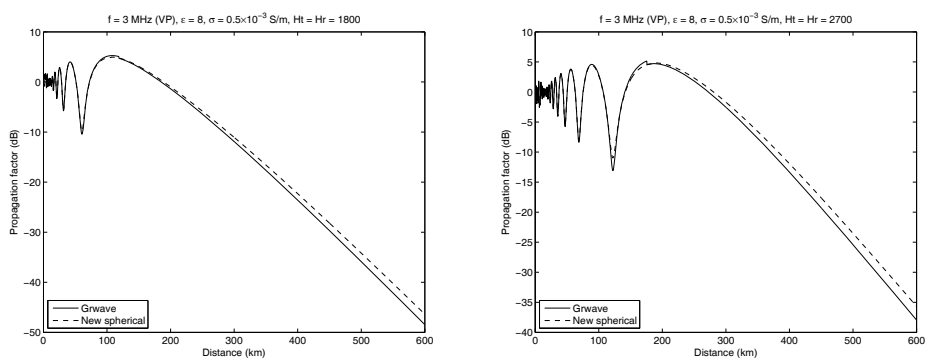
Figur 61 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 400 m.



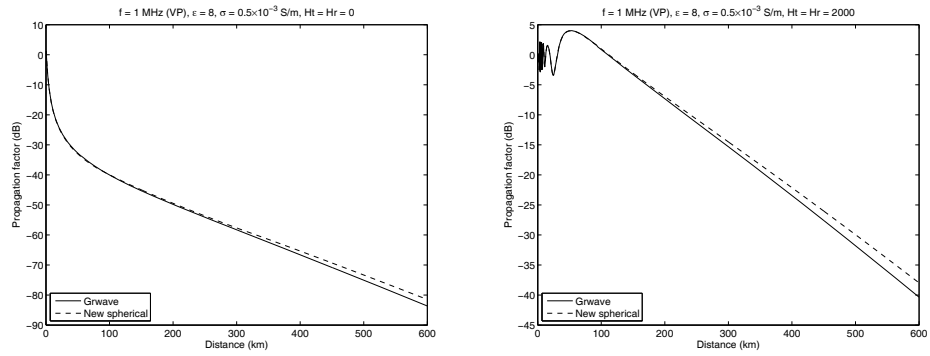
Figur 62 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 10 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 800 respektive 1200 m.



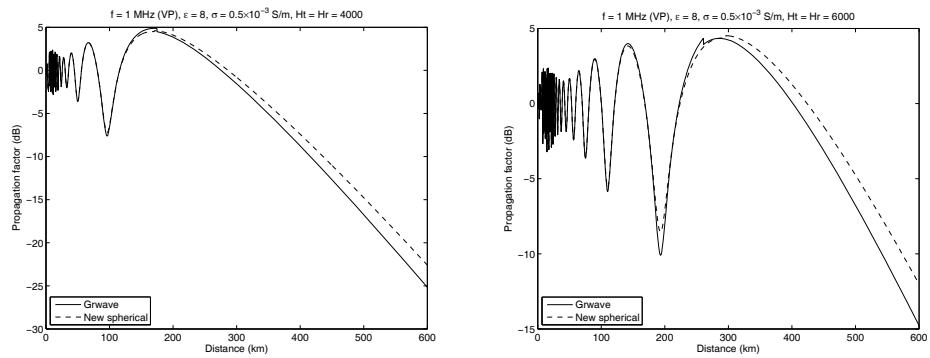
Figur 63 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 900 m.



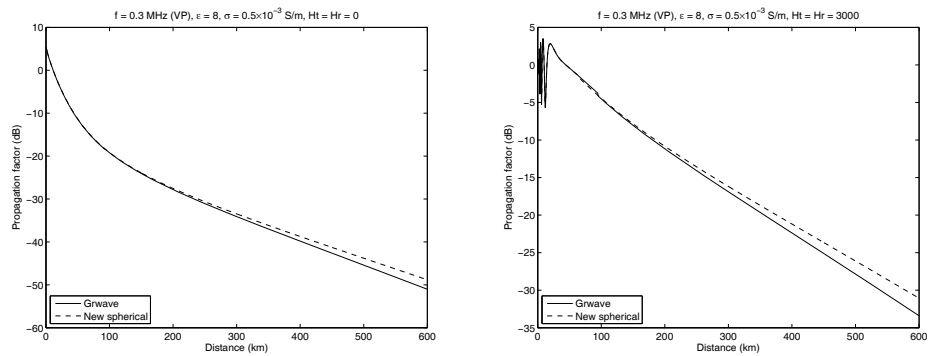
Figur 64 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 1800 respektive 2700 m.



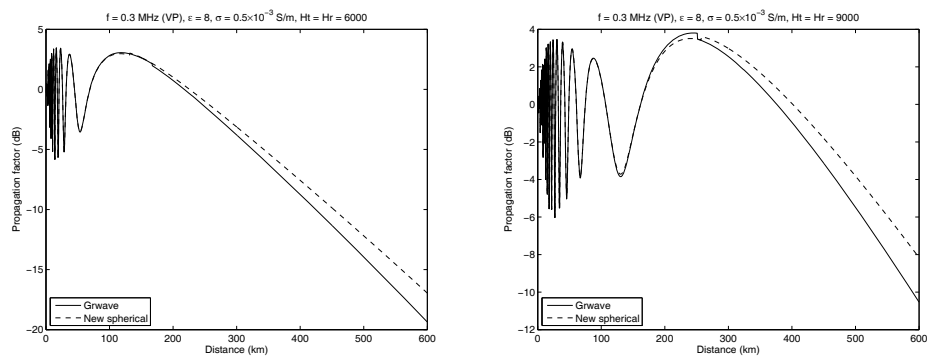
Figur 65 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 2000 m.



Figur 66 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 1 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 4000 respektive 6000 m.



Figur 67 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 0 respektive 3000 m.



Figur 68 Jämförelse mellan GRWAVE och den nya sfäriska jordmodellen för frekvensen 0.3 MHz. Sändar- och mottagarhöjden är 6000 respektive 9000 m.

5 Sammanfattning

Tre nya modeller för vågutbredning över jord har utvecklats. En för jämn plan jord och två för jämn sfärisk jord. Den plana jordmodellen i avsnitt 2 fungerar bra när jordytan kan anses vara plan. Villkoret för det är att avståndet d uppfyller; $d < 8 \times 10^3 \lambda^{1/3}$. För de använda frekvenserna i denna rapport ger det följande maximala avstånd: 5.36 km för 1000 MHz, 8 km för 300 MHz, 11.54 km för 100 MHz, 17.24 km för 30 MHz, 24.86 km för 10 MHz, 37.13 km för 3 MHz, 53.55 km för 1 MHz och 80 km för 0.3 MHz. Är detta villkor uppfyllt är felet mindre än 1 dB, förutom i så kallade interferensminimum där felet kan bli större nära det maximala avståndet.

Den nya förenklade sfäriska modellen i avsnitt 3 har också en begränsning, men då i höjddled. Den har egentligen också en begränsning i avstånd, men då är det fråga om låga frekvenser, mycket höga höjder och mycket långa avstånd. Om villkoret $h_t + h_r < \lambda(R/\lambda)^{1/3}$ (R =effektiva jordradien, h_t =sändarhöjden, h_r =mottagarhöjden) är uppfyllt ska felet inte vara större än ungefär 1 dB. För de använda frekvenserna i denna rapport ger det följande maximala höjd för summan av sändar- och mottagarhöjd; 91 m för 1000 MHz, 204 m för 300 MHz, 424 m för 100 MHz, 947m för 30 MHz, 1970 m för 10 MHz, 4396 m för 3 MHz, 9143 m för 1 MHz och 20403 m för 0.3 MHz. Anmärkning: De presenterade kurvorna, figur 9-32, är alla för fallet $h_t = h_r$. Om vi t.ex. dubblar höjden för sändaren (dvs h_t) och sätter höjden för mottagaren till noll (dvs $h_r = 0$), får man ett något bättre resultat, dvs mindre fel. Skillnaden är dock ganska marginell.

Den nya sfäriska modellen i avsnitt 4 har inte samma begränsning i höjddled som den förenklade modellen i avsnitt 3. Däremot har den på sätt och vis samma problem som den senare modellen för låga frekvenser, mycket höga höjder och mycket långa avstånd. Problemet är dock avsevärt mindre. Den nya sfäriska jordmodellen kan i stort sett alltid användas ned till 3 MHz. För mycket långa avstånd ska felet inte vara större än ungefär 1 dB, kanske något mer för höjder över 1000 m; se figur 63-64. För ännu lägre frekvenser blir felet mer uppenbart, men fortfarande bara för mycket långa avstånd. Tyvärr är långa avstånd av större intresse när man går ned i frekvens, eftersom signalstyrkan fortfarande kan vara av betydelse även för mycket långa avstånd; se figur 65-68.

6 Referenser

- [1] K. A. Norton, "The propagation of radio waves over the surface of the earth and in the upper atmosphere," Part I, Proc. Inst. Radio Engineers, vol. 24, no. 10, pp. 1367-1387, 1936; Part II, Proc. Inst. Radio Engineers, vol. 25, no. 9, pp. 1203-1236, 1937.
- [2] Åke Blomquist, "Markvågsmodell för VHF-området vid sfärisk jordyta," FOA, Stockholm, Report A 3763-E2 1973.
- [3] S. Rotheram, "Ground-wave propagation. Part 1: Theory for short distances," IEE Proc., vol. 128, Pt. F, no. 5, Oct. 1981; S. Rotheram, "Ground-wave propagation. Part 2: Theory for medium and long distances and reference propagation curves," IEE Proc., vol. 128, Pt. F, no. 5, Oct. 1981.
- [4] H. Bremmer, "Terrestrial radio waves," Elsevier, New York, 1949.
- [5] D. A. Hill and J. R. Wait, "Ground wave attenuation function for a spherical earth with arbitrary surface impedance," Radio Science, vol. 15, no. 3, pp. 637-643, May-June 1980.