

Björn Lundqvist, Eva Dalberg och Tim Fristedt

Försök med mätningar av elektromagnetiska fälts rums- och tidskorrelationer i en kustnära miljö

TOTALFÖRSVARETS FORSKNING SINSTITUT

Avdelningen för Systemteknik

SE-172 90 Stockholm

FOI-R--0178--SE

Oktober 2001

ISSN 1650-1942

Teknisk rapport

Björn Lundqvist, Eva Dalberg och Tim Fristedt

Försök med mätningar av elektromagnetiska fälts rums- och tidskorrelationer i en kustnära miljö

Utgivare Totalförsvarets Forskningsinstitut - FOI Avdelningen för Systemteknik SE-172 90 Stockholm	Rapportnummer, ISRN FOI-R--0178--SE	Klassificering Teknisk rapport
	Forskningsområde 4. Spaning och ledning	
	Månad, år September 2001	Projektnummer E6008
	Verksamhetsgren 5. Uppdragsfinansierad verksamhet	
	Delområde 43 Undervattenssensorer	
Författare/redaktör Björn Lundqvist Eva Dalberg Tim Fristedt	Projektledare Johan Mattsson	
	Godkänd av 	
	Tekniskt och/eller vetenskapligt ansvarig Peter Sigray	
Rapportens titel Försök med mätningar av elektromagnetiska fälts rums- och tidskorrelationer i en kustnära miljö		
Sammanfattning En intressant frågeställning vid utvecklingen av ett system för magnetisk detektion (MAD) av främmande föremål är huruvida en separat referenssensor kan ge tillräcklig information om den elektromagnetiska bakgrunden för att föremålets signal skall kunna filtreras fram ur rådata. I denna rapport presenteras en studie av det jordmagnetiska fältets rums- och tidskorrelationer i en typisk kustnära miljö. För detta ändamål valdes området kring Djupviken i Stockholms södra skärgård. Mätningarna visade att korrelationerna var starkt frekvensberoende, med sämre korrelationer för de högre frekvenskomponenterna. För ofiltrerade data, där dc-komponenten tagits bort genom en subtraktion av tidsmedelvärdet, krävdes förskjutningstider på 3,6 - 4,7 h för att autokorrelationskurvan skulle nå sitt första nollställe. För data som högpasfilterats med den undre gränshänsnittsfrekvensen 20 mHz (lägsta frekvensen i MAD-bandet) erhöles istället ca 10 s. På samma sätt sänkte filtreringen rumskorrelationens tidsmedelvärde. För en mätning med magnetometeravståndet 780 m sjönk det från 0,62 till 0,26, och för en mätning med avståndet 520 m sjönk det från 0,73 till 0,40.		
Nyckelord geomagnetiska fältet, rumskorrelation, tidskorrelation, fluxgate-magnetometer		
Övriga bibliografiska uppgifter	Språk Svenska	
ISSN 1650-1942	Antal sidor: 12 s.	
Distribution enligt missiv	Pris: Enligt prislista Sekretess	

Issuing organization FOI – Swedish Defence Research Agency Division of Systems Technology SE-172 90 Stockholm	Report number, ISRN FOI-R--0178--SE	Report type Technical report
	Research area code 4. C4ISR	
	Month year September 2001	Project no. E6008
	Customers code 5. Contracted Research	
	Sub area code 43 Underwater Surveillance Sensors	
Author/s (editor/s) Björn Lundqvist Eva Dalberg Tim Fristedt	Project manager Johan Mattsson	
	Approved by	
	Scientifically and technically responsible Peter Sigray	
Report title (In translation) Field trial with measurements of spatial and temporal correlations of electromagnetic fields in a coastal environment		
Abstract An interesting problem when developing a system for magnetic anomaly detection (MAD) of foreign objects concerns the ability of a separate reference sensor to provide sufficient information on the electromagnetic background to make it possible to filter out the signal of the object itself from the noisy raw-data. In this report a study of the spatial and temporal correlations of the geomagnetic field for a typical coastal environment is presented. The surroundings of Djupviken in the southern archipelago of Stockholm were chosen for this purpose. The measurements showed a strong frequency dependence of the correlations, with the higher frequency components less correlated in both time and space. For unfiltered data, where the dc-component had been removed by a subtraction of the mean value of the time series, time lags in the range of 3.6 to 4.7 hours were required for reaching the first zero-crossing of the autocorrelation curve. For data, which have been high-pass filtered with a cut-off frequency of 20 mHz (corresponding to the lowest frequency of the MAD-frequency band), a lag time of about 10 s was obtained instead. In the same way the time average of the spatial correlation decreased by the filtering. For a measurement performed with a distance of 780 m between the magnetometers it decreased from 0.62 to 0.26, and for a magnetometer separation of 520 it decreased from 0.73 to 0.40.		
Keywords Geomagnetic field, spatial correlation, temporal correlation, fluxgate magnetometer		
Further bibliographic information	Language Swedish	
ISSN 1650-1942	Pages 12 p.	
	Price acc. to pricelist Security classification	

Innehållsförteckning

1. Bakgrund.....	5
2. Mätförfarande.....	5
3. Mätresultat.....	6
4. Tidskorrelationer och MAD.....	11
5. Sammanfattning.....	11
Referenser.....	12

1. Bakgrund

Magnetiska föremål kan detekteras via den magnetiska anomali eller störning av det geomagnetiska fältet de ger upphov till. Metoden, som går under benämningen MAD (från engelskans "Magnetic Anomaly Detection"), bygger på att en karakteristisk signal genereras i en magnetometer då den rör sig i förhållande till en magnetfältsbild som skapats av föremålet som skall detekteras (t ex en ubåt). Arbeten som behandlar denna metod och en del av dess problemställningar kan hittas i referenserna [1-5].

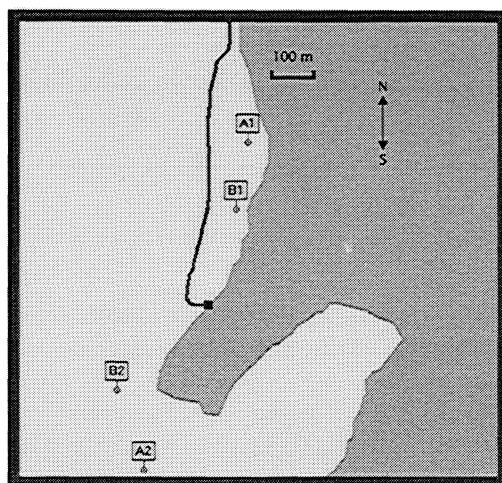
Den uppmätta signalen i magnetometern innehåller även brus från den omgivande geologiska miljön samt så kallat kulturbrus som härrör från övrig elektromagnetisk aktivitet (t ex kraftledningar, elektriskt drivna tåg samt elektriska anläggningar och installationer). Det kan vara svårt att filtrera data för att finna en signal, som har genererats av ett främmande undervattensföremål. Detta gäller speciellt i kustnära miljöer med grunda vatten där både berggrund och andra miljöfaktorer kan ge stora bidrag.

En intressant frågeställning är huruvida en separat referenssensor kan utnyttjas för att ge tillräcklig information om den elektromagnetiska bakgrunden för att densamma skall kunna subtraheras från signalen i ett stationärt eller rörligt detektionssystem. För att få ökad förståelse för detta problem genomfördes under mars månad år 2001 ett fältförsök vid Djupviken i Stockholms södra skärgård. Syftet var att undersöka rums- och tidsskorrelationer för det geomagnetiska fältet i en kustnära miljö.

2. Mätförfarande

Det geomagnetiska fältet mättes med två stycken tre-axliga fluxgate-magnetometrar med brusnivån $0,01 \text{ nT/Hz}^{1/2}$ vid frekvensen 1 Hz. Undersökningarna genomfördes för två olika magnetometeruppställningar (se figur 1). Den första mätserien gjordes med magnetometrarna placerade i positionerna A1 och A2 (där siffran anger magnetometernumret). Med hjälp av en GPS-navigator bestämdes avståndet mellan de båda instrumenten till ca 780 m. Efter en vecka minskades avståndet till 520 m genom att magnetometrarna flyttades till B1 och B2. Position A1 var belägen uppe på ett berg, B1 och B2 på bergssluttningar och A2 nere i en relativt fuktig sänka fylld med sedimenterat material. Magnetometrarna sattes fast på var sin cementplatta för att ökad stabilitet skulle uppnås. De riktades in med hjälp av kompass och vattenpass, så att z-axeln var riktad nedåt längs lodlinjen, x-axeln pekade mot öster och y-axeln mot söder. Slutligen täcktes de över med lådor klädda med vit frigolit för att förhindra uppvärmning orsakad av direkt solbelysning.

Datainsamlingen gjordes automatiskt med hjälp av en dator och en 23-bitars AD-omvandlare. Insamlingsfrekvensen var satt till 1 Hz, vilken åstadkoms genom att sekundvis medelvärdesbilda data som samplersats med en underliggande frekvens av 100 Hz. Varje timme avbröts detta insamlingsförfarande under en tidsperiod av 5 minuter, under vilken data sparades direkt med samplingsfrekvensen 100 Hz. För att undvika invikningseffekter användes lågpasfilter med en övre gränsfrekvens av 40 Hz. Efter mätningarna räknades fältets absolutbelopp fram för att senare ligga till grund för analysen.



Figur 1. Skissartad karta över området runt Djupviken där mätningarna ägde rum. Korrelationsmätningarna gjordes för två olika magnetometeruppställningar: A1-A2 och B1-B2, vilka gav magnetometeravstånden 780 respektive 520 m.

3. Mätresultat

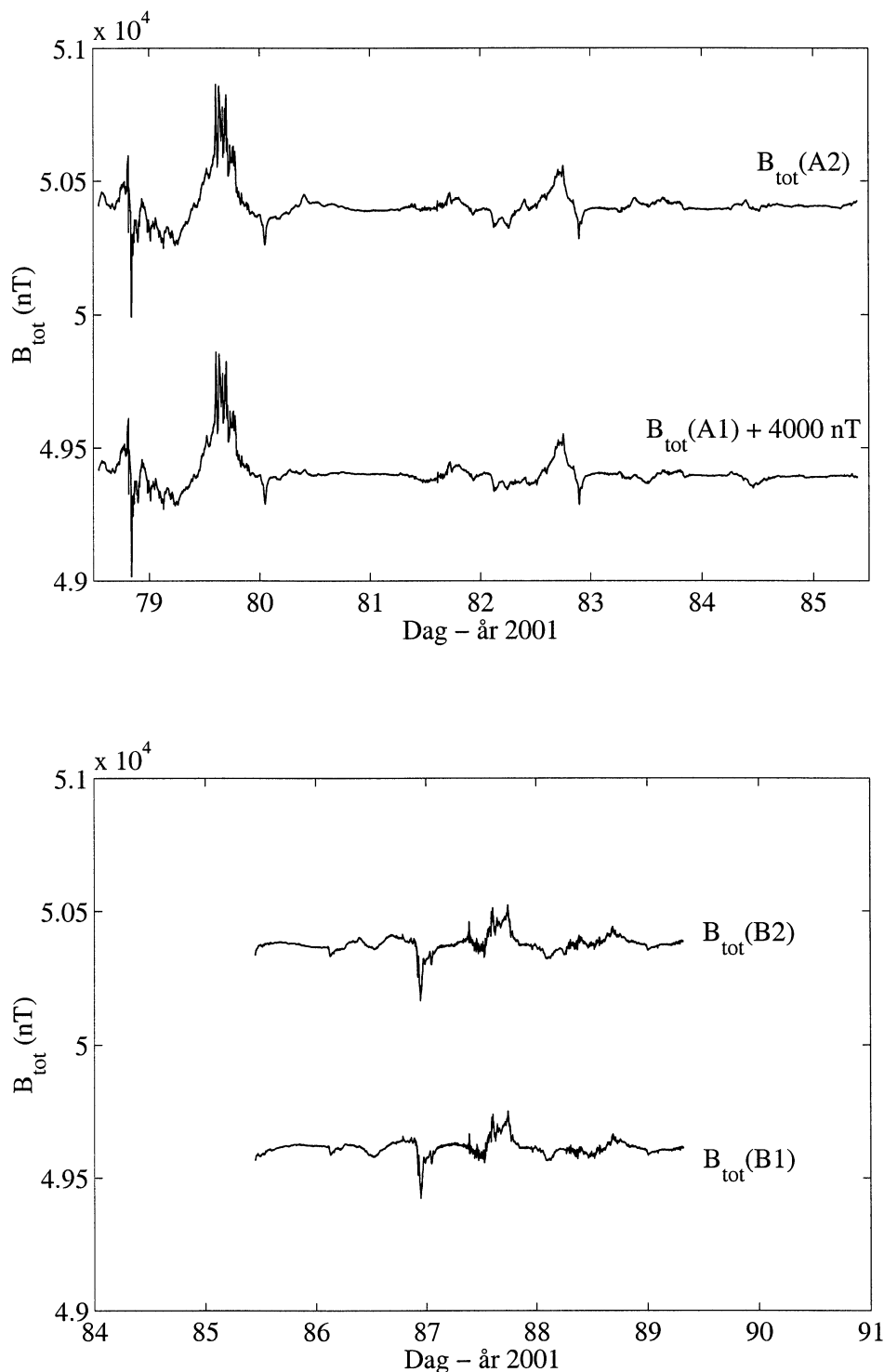
Huvuddelen av analysen utfördes på de data som samlats in med 1 Hz, och så länge ingenting annat uttryckligen nämns i texten är det dessa data som diskuteras nedan. Figur 2 visar tidsutvecklingen hos absolutbeloppet av det jordmagnetiska fältet. Från tidsserierna framgår det med all tydlighet att relativt stora fältvariationer ägde rum under dagarna 78, 79, 82 och 87, medan lugna förhållanden rådde under de övriga dagarna. På stora tidsskalor följer tidsutvecklingarna varandra ganska väl. En närmare granskning avslöjar dock skillnader (se exempelvis dag 84). Mellan position A1 och A2 skiljer sig dessutom fältstyrkans amplitud med ca 10 %. Denna skillnad kan mycket väl härröra från olikheterna i de geologiska omgivningarna kring A1 och A2. Notera att A1 var placerad mer eller mindre direkt på berggrunden medan A2 låg i en jord- eller sandfylld sänka. Denna förklaring stöds av att skillnaden minskade till ca 1,5 % efter det att magnetometrarna hade flyttats till B1 och B2. Den stora skillnaden uppmätt mellan A1 och A2 bör därför inte tas som ett resultat av en felaktig kalibrering eller ett internt offset-fel i själva instrumenten.

I figur 3 visas exempel på frekvensspektra för fältet mätt i position A1. De kan anses vara representativa för alla fyra magnetometerpositionerna. Dessa spektra har beräknats för sextimmarsintervall och femminutersintervall för data insamlade med 1 Hz respektive 100 Hz. För frekvenser upp till ca 2 Hz minskar amplituden med ökande frekvens. I 100 Hz-data syns tydliga toppar för kraftnätets och järnvägsnätets frekvenser (50 resp. 16 2/3 Hz).

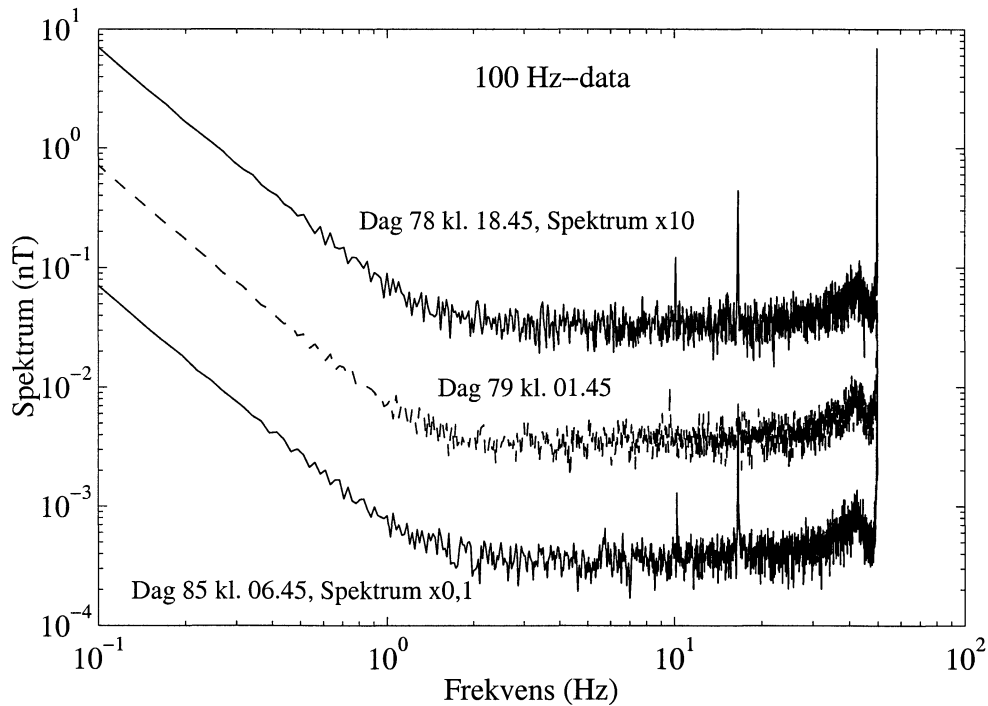
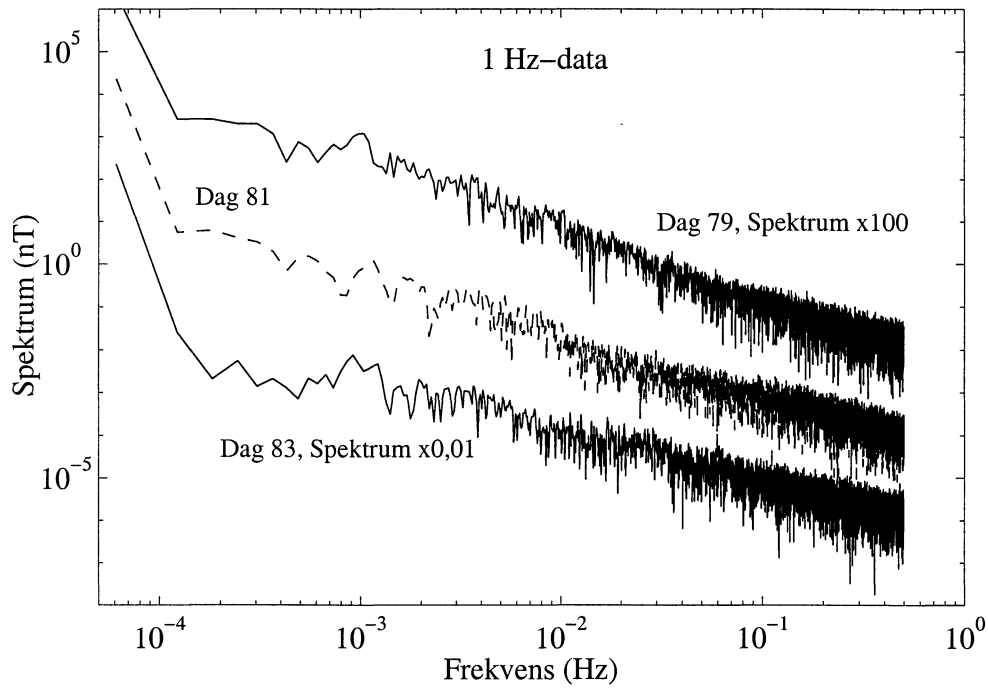
För att undersöka tidsutvecklingen av rumskorrelationen delades tidsserierna in i ett antal 5 minuter långa datablock, och därefter beräknades korrelationskoefficienten, ρ_{rum} , för vart och ett av dessa block. Resultaten för de båda uppställningarna visas i figurerna 4a och 4c. Som ett mått på rumskorrelationen under en hel tidsserie togs medelvärdet av de beräknade korrelationskoefficienterna. För A1-A2 och B1-B2 erhöles 0,62 respektive 0,73.

De intressanta frekvenserna för MAD-tillämpningarna ligger i det så kallade MAD-bandet som sträcker sig från 0,02 till 2,0 Hz. För att studera rumskorrelationen för dessa frekvenser högpasfilterades data med hjälp av ett tredje ordningens

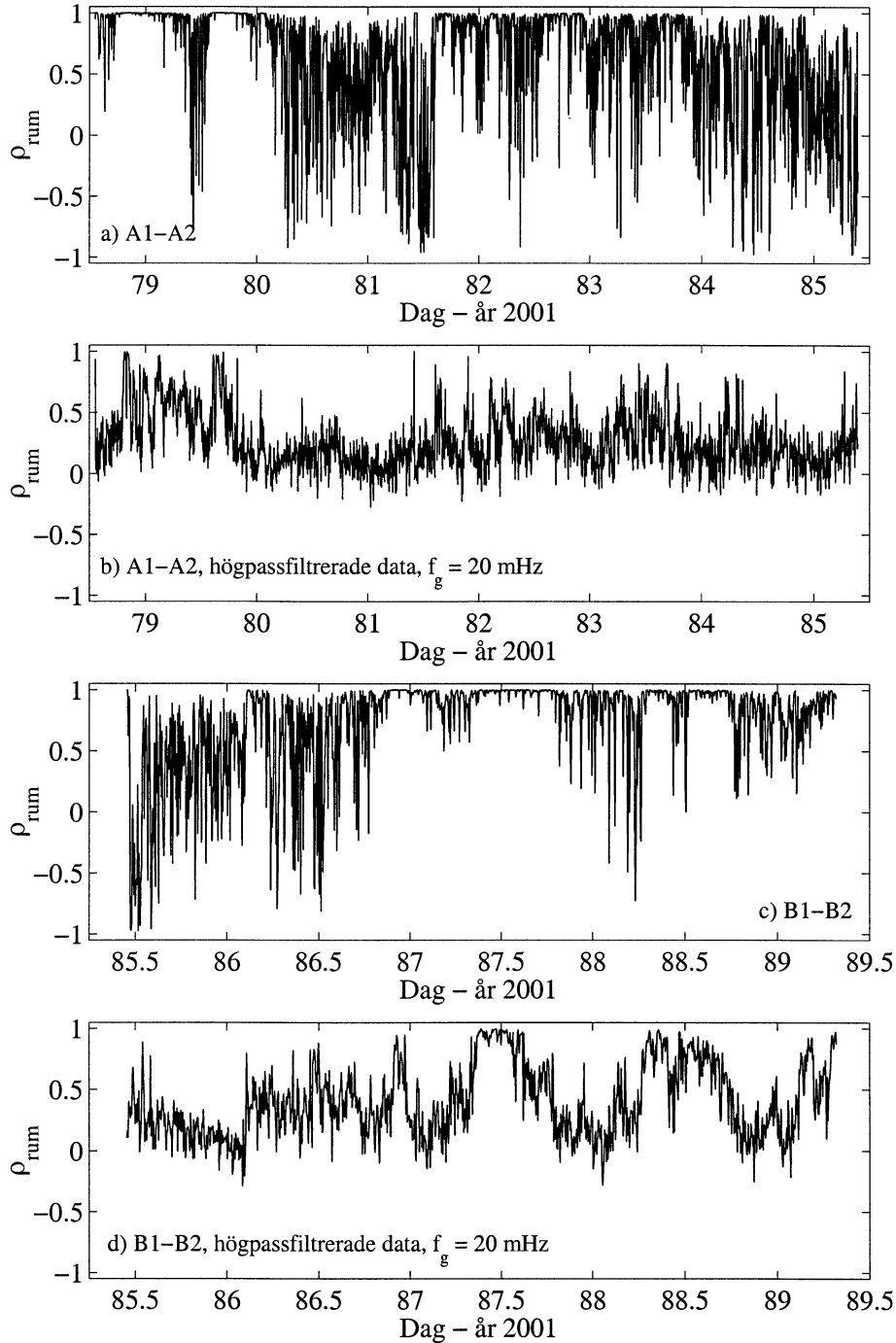
Butterworth-filter med den undre gränshfrekvensen $f_g = 20$ mHz. De nya resultaten för tidsutvecklingarna visas i figurerna 4b och 4d. Här framgår att en uteslutning av dc-komponenten och de lägsta frekvenserna medför en reducering av rumskorrelationen. Som en naturlig följd avspeglas detta även i rumskorrelationernas medelvärden, vilka sjönk till 0,26 och 0,40 för A1-A2 repektive B1-B2.



Figur 2. Tidsutvecklingen av det jordmagnetiska totalfältet i positionerna A1 och A2 (övre panelen) samt i B1 och B2 (undre panelen). För att öka figurens tydlighet har 4000 nT adderats till fältet uppmätt i position A1.



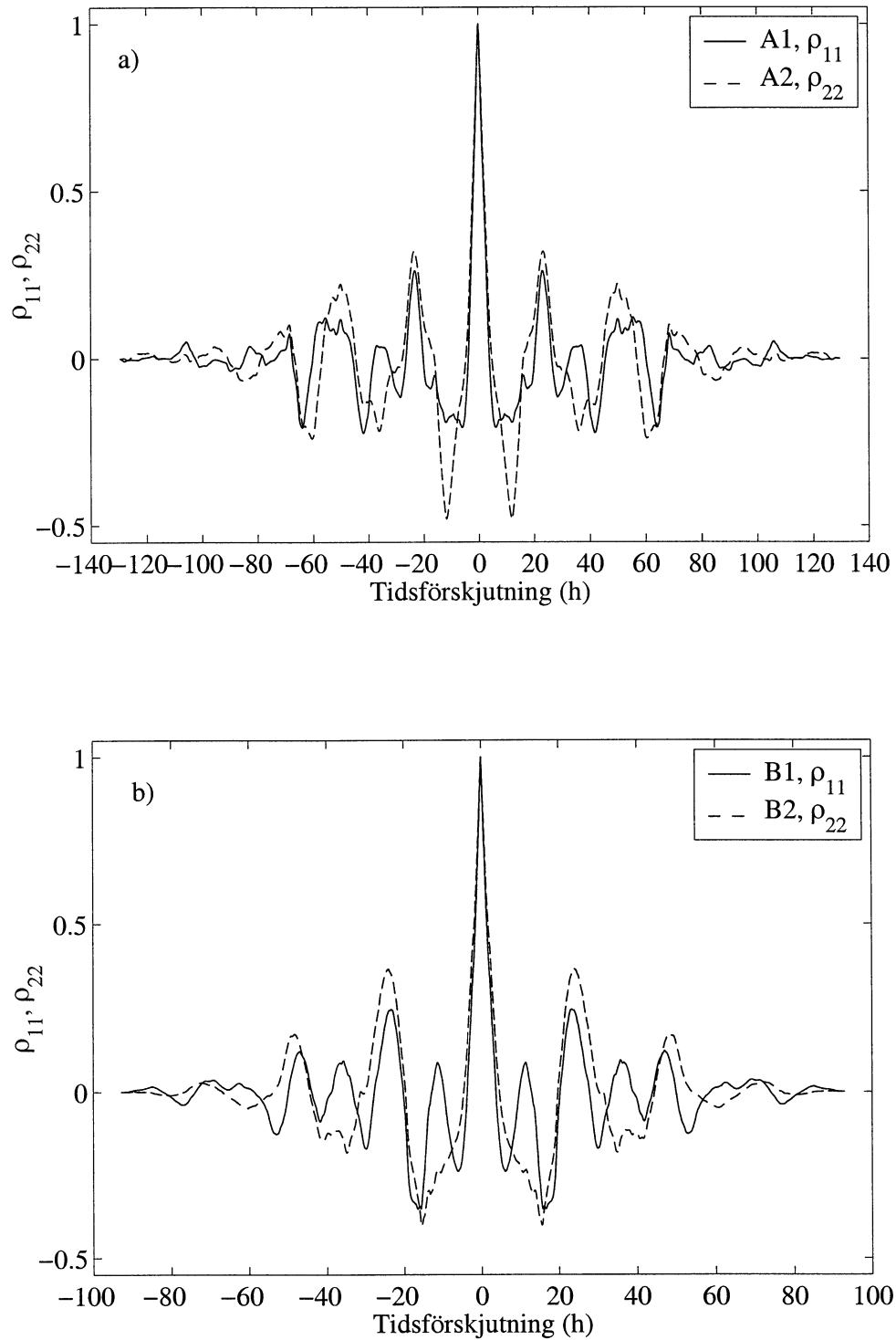
Figur 3. Totalfältets frekvensspektrum uppmätt vid position A1. Övre panelen: Spektra beräknade för sextimmarsperioder med början klockan 15.00 varannan dag. För figurens tydlighet har kurvorna för dag 79 och 83 flyttats genom att multiplicera spektrum med 100 respektive 0,01. Undre panelen: Exempel på frekvensspektra framräknade ur data som samlats in under 5-minutersperioder med samplingsfrekvensen 100 Hz. Tydliga toppar ses vid kraftnätets frekvens 50 Hz. Vid tider för rusningstrafik ses även toppar vid järnvägsnätets frekvens $16 \frac{2}{3}$ Hz. Kurvorna för dag 78 och 85 flyttats genom att multiplicera spektrum med 10 respektive 0,1.



Figur 4. Tidsutvecklingen av rumskorrelationen, ρ_{rum} , för A1-A2 (a,b) och B1-B2 (c,d). I panelerna a och c visas resultaten för ofiltrerade data, medan motsvarande för högpasfilterade data återfinns i b och d.

Tidskorrelationen undersöktes genom att beräkna autokorrelationen ρ_{xx} (med $x = 1$ och 2 för magnetometer 1 respektive 2). Före beräkningarna subtraherades tidsseriernas medelvärden och eventuella stigande eller sjunkande trender från data. Dessutom togs samtliga data uppmätta under dagarna 78 och 79 bort ur tidsserierna för A1 och A2. Detta gjordes för att undvika effekter av de kraftiga fältvariationer som rådde under dessa dagar. Resultaten för autokorrelationerna visas i figur 5. Den

kritiska tidsförskjutningen, τ_c , som behövs för att korrelationskurvan skall nå sin första nollgenomgång, kan tas som ett mått på tidsskalan på vilken korrelationen förloras. Ur kurvorna fås $\tau_c \approx 3,8, 4,7, 3,7$ och $4,6$ timmar för mätserierna A1, A2, B1 respektive B2. Dessa tider är mycket kortare än mätseriernas längder, som därför inte borde ha någon begränsande inverkan på resultatet.



Figur 5. Autokorrelationen, ρ_{xx} ($x = 1$ eller 2), för totalfältets tidsserier uppmätta i magnetometerpositionerna A1 och A2 (panel a) samt B1 och B2 (panel b). Första nollstället inträffar för en tidsförskjutning av ca 3 till 5 timmar (se texten).

Vid sidan av huvudmaximat framträder oscillationer i korrelationskurvorna. De är tecken på att toner finns i bakgrunden. För de två tydligaste fås periodtider på ca 12,5 och 24 timmar ur data. Den förstnämnda stämmer väl överens med den halvdagliga huvudmånkomponenten, M_2 , som har periodtiden 12,42 h och uppkommer på grund av jordens rotation runt sin egen axel relativt månen. Mekanismen är liknande den som styr det halvdagliga huvudmånstidvattnet [6]. I det geomagnetiska fallet leder dock gravitations- och centrifugalkrafterna till en deformation av atmosfären, vilken under sin väg runt jorden i sin tur orsakar jonosfäriska strömmar och därmed också fältvariationer [7]. En bidragande orsak till 24-timmarsvariationerna grundar sig på en uppvärmning och expansion av den del av atmosfären som vänds mot solen [7]. En annan baserar sig på solvindens infall och växelverkan med det jordmagnetiska fältet. Båda dessa effekter leder till jonosfäriska strömmar och periodiska fältvariationer allt eftersom jorden på 24 timmar roterar runt sin egen axel (och därmed också relativt dessa strömsystem).

4. Tidskorrelationer och MAD

För att undersöka tidskorrelationen för frekvenser som är av intresse för MAD-tillämpningar högpasfilterades data med den undre gränshfrekvensen $f_g = 20$ mHz. Resultatet var att τ_c sjönk till ca 10 s. Liknande analyser av slumpvist utvalda dataserier, som samlats in med samplingsfrekvensen 100 Hz och därefter bandpassfilterats mellan 1 Hz och 20 Hz, gav ett τ_c som låg i storleksordningen av bråkdelen av en sekund (typiskt värde 30 ms). Dessa tider är mycket korta jämfört med den tid det tar för ett magnetometerbestyckat flygplan att mäta upp eller söka av ett geografiskt område. Detta innebär att en separat referenssensorns information mycket snabbt blir inaktuell i det intressanta frekvensområdet. Med resultaten från figur 5 i åtanke är det därför inte det geomagnetiska fältets tidskorrelationer som är den begränsande faktorn, utan snarare MAD-tillämpningarnas frekvensband. Detta behöver inte nödvändigtvis leda till allvarliga konsekvenser för ett MAD-system, som används i en kustnära miljö med grunda vatten. Istället bör mer förfinade metoder för bakgrundsreducering undersökas.

5. Sammanfattning

Med hjälp av två magnetometrar har det geomagnetiska fältets rums- och tidskorrelationer studerats i en typisk kustnära miljö. För detta ändamål valdes området kring Djupviken i Stockholms södra skärgård. Mätningarna visade att korrelationerna var starkt beroende av det undersökta frekvensområdet, med sämre korrelationer för de högre frekvenserna. För ofiltrerade data, där dc-komponenten tagits bort genom en subtraktion av tidsmedelvärdet, krävdes förskjutningstider på 3,6 - 4,7 h för att autokorrelationskurvan skulle nå sitt första nollställe. För data som högpasfilterats med den undre gränshfrekvensen 20 mHz (lägsta frekvensen i MAD-bandet) erhöles istället ca 10 s. På samma sätt sänktes rumskorrelationens tidsmedelvärde av filtreringen. För en mätning med magnetometeravståndet 780 m sjönk det från 0,62 till 0,26, och för en mätning med avståndet 520 m sjönk det från 0,73 till 0,40.

Referenser

- [1] James A. Brennan and Kuno Smits, *The Effect of Geomagnetic Micropulsations on MAD Systems* (Naval Oceanographic Office, Department of the Navy, Washington, D.C. 20373, USA, 1975).
- [2] Jeffrey Mark Schweiger, *Evaluation of Geomagnetic Activity in the MAD Frequency Band (.04 to 0.6 Hz)* (Naval Postgraduate School, Monterey, CA 93943, USA, 1982).
- [3] A. Bernardi, A. C. Fraser-Smith, and O. G. Villard, *A Real Time Index of Geomagnetic Background Noise for the M.A.D. Frequency Range* (Space, Telecommunications and Radioscience Laboratory (STARLAB), Department of Electrical Engineering / SEL, Stanford University, Stanford, CA 94305, USA, 1985).
- [4] W. M. Gobau, P. M. Maxton, R. H. Koch, and J. Clarke, *Noise Correlation in Remote Reference Magnetotellurics*, *Geophysics*, **49**, 433 (1984).
- [5] E. A. Nichols, H. F. Morrison, and J. Clarke, *Signals and Noise in Measurements of Low-Frequency Geomagnetic Fields*, *J. Geophys. Res.* **93**, 13743 (1988).
- [6] Paul R. Pinet, *Invitation to Oceanography*, 2nd ed. (Jones and Bartlett Publishers, Sudbury, USA, 2000).
- [7] Wallace H. Campbell, *Introduction to Geomagnetic Fields* (Cambridge University Press, Cambridge, UK, 1997).