

Figura 4.23: SNR (mediana) en funció de la freqüència i l'hora, mesurada en tres amplituds de banda (1000 Hz, 3000 Hz i 5000 Hz)

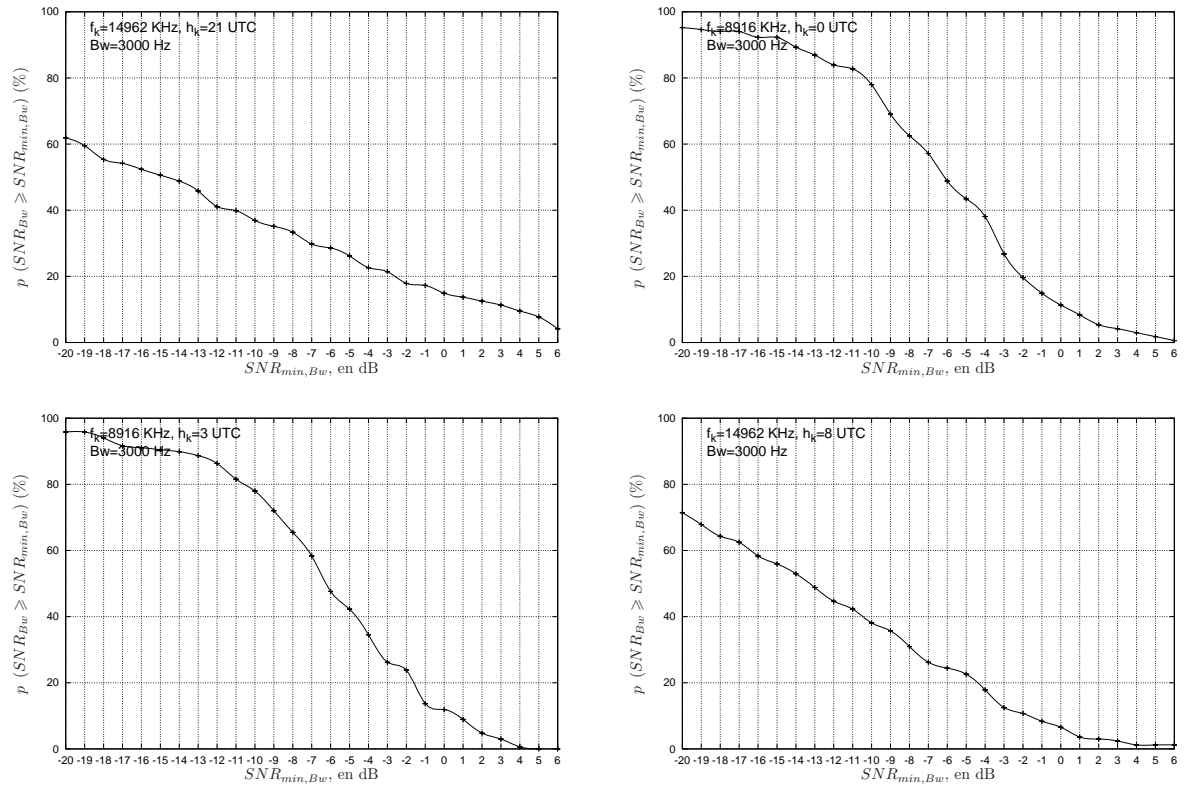


Figura 4.24: Probabilitat acumulada d'obtenir una $SNR_{Bw} \geq SNR_{min,Bw}$ ($Bw = 3000$ Hz), calculada a quatre hores (21 UTC, 0 UTC, 3 UTC i 8 UTC). S'avaluen dues de les freqüències més significatives d'acord amb la figura 4.25

4.10.4 Freqüències amb màxima disponibilitat a cada hora

En base a les mesures de SNR a un ample de banda Bw , s'intueix que a cada hora existirà una freqüència a la qual la probabilitat d'obtenir una SNR superior a una de mínima serà màxima. S'obtidran així gràfiques de la disponibilitat màxima en banda ampla per una $SNR_{min,Bw}$ i en funció de l'hora ($Dw(h)_{f,\vec{j}}$). A continuació s'inclouen quatre figures corresponents a un ample de banda $Bw = 3000$ Hz i $SNR_{min,3000}$ de -9 dB, -6 dB, -3 dB i 0 dB (figura 4.25). S'observa que:

- Per un requeriment de $SNR_{min,3000}$ baix en termes relatius (-9 dB) s'observa una tendència general marcada per: (i) En un ampli marge d'hores de la nit (des de les 23 UTC fins a les 6 UTC, ambdues incloses) la millor freqüència en termes de disponibilitat volta els 8 MHz - 9 MHz. A més, entre les 23 UTC i les 4 UTC la disponibilitat màxima supera el 60 %; (ii) Abans de les 23 UTC i després de les 6 UTC, les millors freqüències són més altes (a partir de 13 MHz - 14 MHz). Per la vesprada, la disponibilitat és major com més a prop de la nit (al voltant del 50 % a les 21 UTC a 13 MHz i del 45 % a les 22 UTC a 15 MHz), i per la matinada assoleix el màxim a les 8 UTC (sobre el 50 % a 15 MHz).
- Per un requeriment de $SNR_{min,3000}$ relativament elevat (0 dB) la màxima disponibilitat volta el 30 % a les 21 UTC a 15 MHz. A plena nit s'assoleixen valors entre el 10 % i el 25 % a freqüències lleugerament superiors al cas anterior ($SNR_{min,3000} = -9$ dB). Els nivells de disponibilitat són, però, molt baixos i en conseqüència les conclusions que se'n puguin treure són poc fiables en termes estadístics.
- Les figures corresponents a $SNR_{min,3000}$ mitges en termes relatius (-6 dB i -3 dB) mostren un lleuger corriment de les millors freqüències cap a bandes més altes entre les 22 UTC i les 00 UTC (respecte al cas de $SNR_{min,3000} = -9$ dB). Concretament, per una $SNR_{min,3000}$ de -9 dB les millors freqüències entre les 22 UTC i les 00 UTC són, respectivament, 14 MHz, 9 MHz, 9 MHz, mentre que quan la $SNR_{min,3000}$ és de -3 dB les millors freqüències esdevenen 15 MHz, 11 MHz, 11 MHz.

Per tant, concloem que:

- Abans de les 23 UTC i després de les 6 UTC, les freqüències amb major disponibilitat són les de la banda alta (13 MHz a 16 MHz). La disponibilitat està per sota del 50 % (pel rang de valors de $SNR_{min,Bw}$ considerat).
- Entre les 23 UTC i les 6 UTC (ambdues incloses), les freqüències al voltant de 9 MHz són les que presenten major disponibilitat. Per valors de $SNR_{min,Bw}$ relativament elevats, les millors freqüències es desplacen lleugerament a l'alça entre les 22 UTC i les 00 UTC.
- L'interval comprés entre les 0 UTC i les 4 UTC (ambdues incloses) presenta el millor comportament per $SNR_{min,Bw}$ per sota de -3 dB. En aquest mateix interval horari, s'observa que per valors de $SNR_{min,Bw}$ entre -9 dB i -3 dB, un increment de 3 dB en el nivell d'exigència de SNR comporta una pèrdua aproximada del 20 % de disponibilitat.

A continuació s'estudia l'efecte de la variació de Bw sobre les freqüències que la maximitzen a cada hora. S'inclouen les gràfiques corresponents a les parelles ($SNR_{min,Bw}$, Bw) indicades

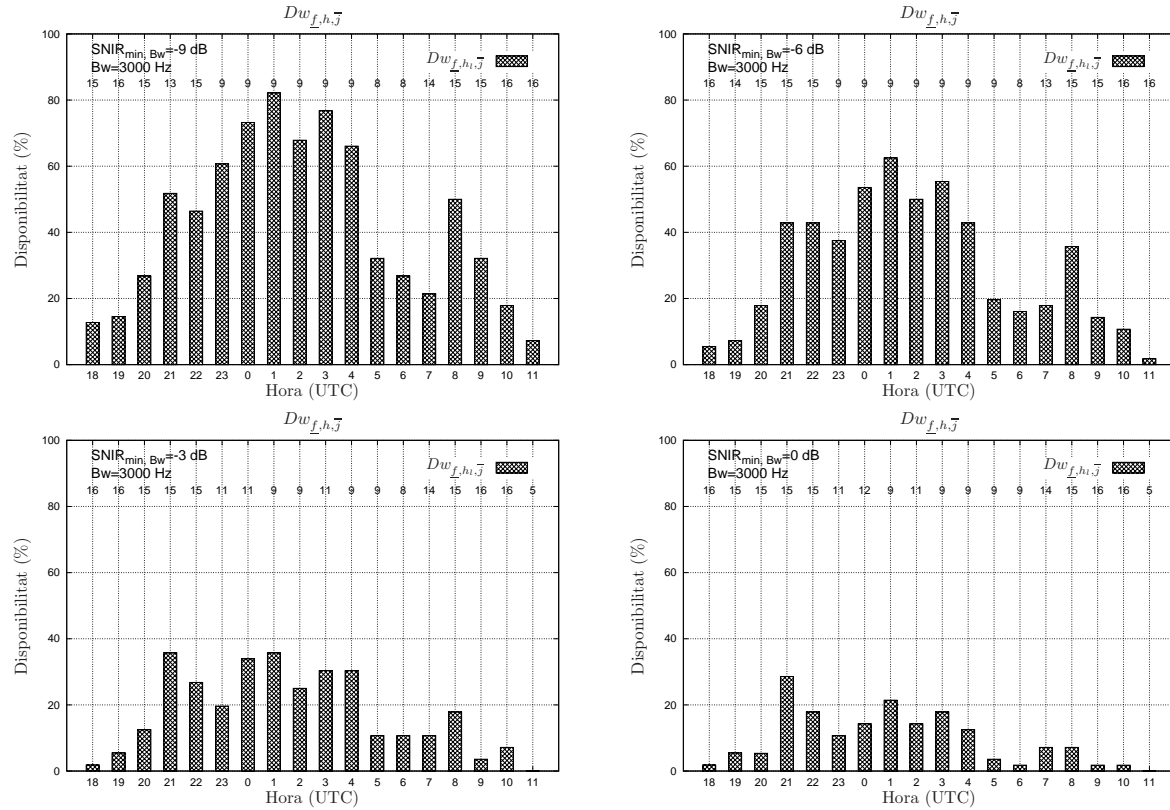


Figura 4.25: Gràfiques corresponents a les freqüències que maximitzen la disponibilitat en banda ampla a cada hora, mesurades en un ample de banda de 3 KHz per quatre valors de $SNR_{min,3000}$: -9 dB, -6 dB, -3 dB, 0 dB (d'esquerra a dreta i de dalt a baix)

a la taula 4.7 (veure figura 4.26). A la tercera columna de la taula s'indica el requeriment de SNR normalitzat respecte a l'ample de banda menor (1 KHz) suposant una distribució de soroll i interferència uniforme en freqüència. Per tant, les configuracions (a), (c) i (e) per una banda (primera columna de la figura 4.26), i les (b), (d) i (f) per una altra (segona columna de la figura 4.26) haurien de ser equivalents sota la hipòtesi d'una distribució de soroll uniforme en freqüència. Els resultats confirmen la hipòtesi per aquests amplitudes de banda estudiats, tant pel que fa a les millors freqüències com als percentatges de disponibilitat.

Configuració	Bw	$SNR_{min,Bw}$	$SNR_{min,1000}$ equivalent
(a)	1000	-4	-4
(b)	1000	5	5
(c)	3125	-9	-4
(d)	3125	0	5
(e)	6250	-12	-4
(f)	6250	-3	5

Taula 4.7: Configuracions ($Bw - SNR_{min,Bw}$) usades per tal d'estudiar l'efecte de la variació de Bw sobre la disponibilitat de l'enllaç en banda ampla i les freqüències que la maximitzen a cada hora. A la tercera columna es normalitza el requeriment de SNR respecte a l'ample de banda de 1 KHZ, suposant el soroll i la interferència uniformement distribuïts en freqüència. L'ample de banda està expressat en Hz i la SNR en dB

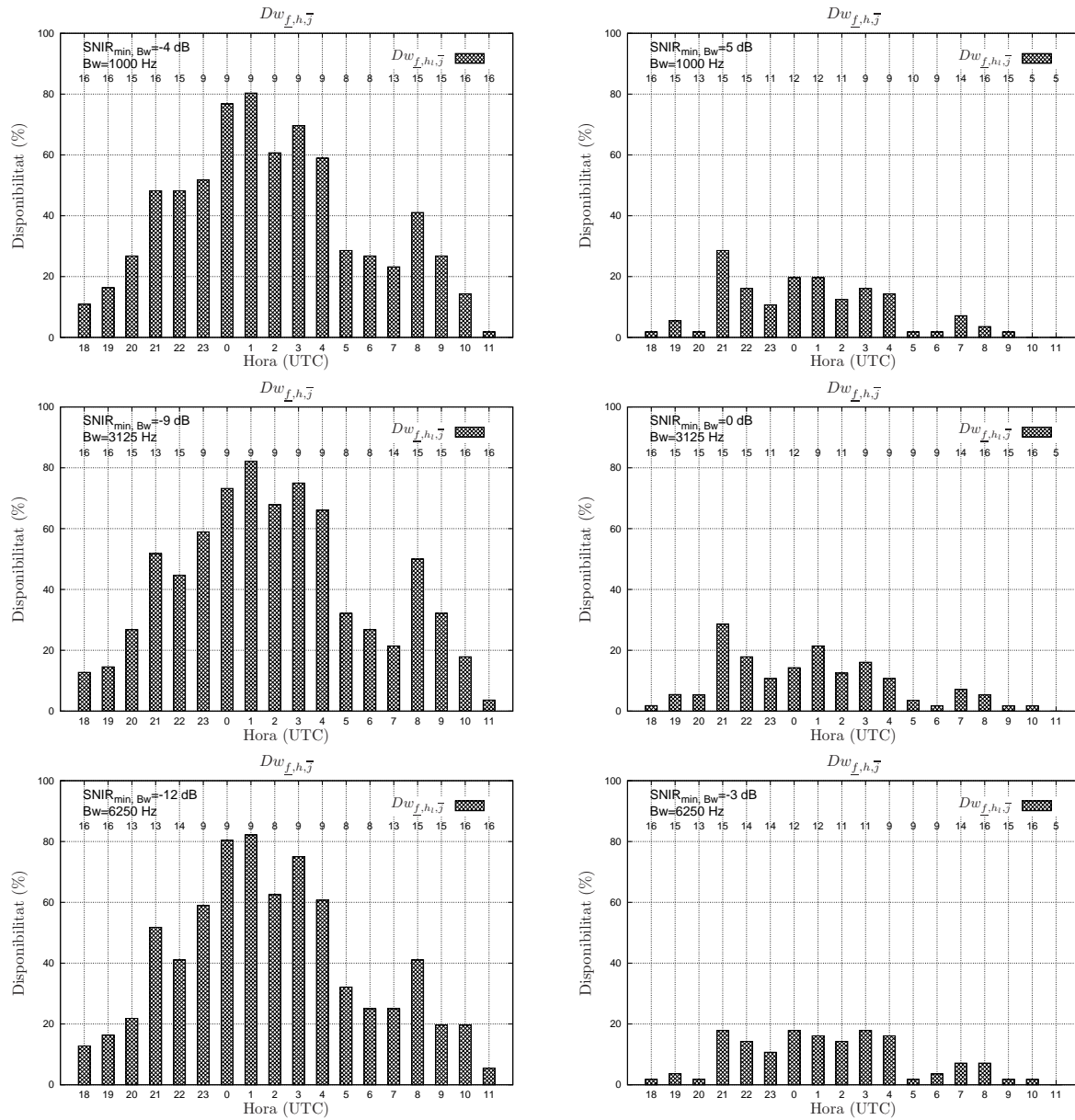


Figura 4.26: Gràfiques corresponents a les freqüències que maximitzen la disponibilitat en banda ampla a cada hora, mesurades en tres amplituds de banda diferents (1000 Hz, 3125 Hz i 6250 Hz). Les $SNR_{min,Bw}$ s'han escollit per tal de compensar la variació d'amplitud en termes de potència de soroll i interferència, suposant-los uniformement distribuïts en freqüència

	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	← Hora
	0.03	0.26	0.53	0.59	0.92	0.39	0.81	0.95	0.80	0.90	0.66	0.42	-0.18	0.31	0.28	0.48	0.95	--	← ICC(h, h+1)
4667	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5564	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.68	1.73	2.18	0.00	0.00	0.00	1.33	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5761	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6538	0.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.79	0.30	0.00	0.00	0.00	0.00	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6964	1.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.14	2.07	2.33	2.06	1.94	1.15	1.16	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7629	0.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.18	2.11	2.17	2.11	1.81	1.12	0.82	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7750	0.84	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.36	1.95	1.98	2.07	1.72	1.74	1.15	0.94	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8078	0.77	0.00	0.00	0.00	0.60	2.13	1.98	2.02	2.16	2.27	2.14	1.82	1.30	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8916	0.80	0.00	0.00	0.00	2.16	2.11	2.12	2.07	2.00	2.30	1.90	1.64	0.96	0.00	1.55	0.00	0.00	0.00	0.00
9293	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	2.13	2.08	2.13	1.98	2.06	1.68	1.54	0.74	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10042	0.85	0.00	0.00	0.00	1.57	1.80	2.23	1.85	2.18	1.65	1.58	1.12	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10239	0.77	0.00	0.00	1.72	1.17	1.91	2.22	1.82	1.99	1.61	1.40	1.15	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10658	0.86	0.00	0.00	1.89	1.48	1.93	2.05	1.58	1.72	1.39	1.26	0.82	0.00	0.88	1.92	1.05	0.00	0.00	0.00
10986	0.98	0.00	0.00	1.57	1.61	1.69	1.76	1.83	1.44	1.25	0.88	0.92	0.00	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00
11411	0.98	0.00	0.00	1.66	1.48	1.90	1.46	1.58	1.26	1.12	0.83	0.71	0.00	0.00	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00
12209	0.67	0.00	0.00	1.31	1.10	1.41	1.24	1.57	1.22	1.12	0.72	0.51	0.00	0.00	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00
12785	0.61	0.00	1.70	1.50	1.05	1.31	1.33	1.42	1.02	0.80	0.81	0.43	0.00	0.00	0.69	1.06	0.00	0.00	0.00
13230	0.65	0.00	0.00	1.14	0.60	1.20	0.85	1.21	1.03	0.76	0.76	0.00	0.00	0.00	0.81	1.00	0.00	0.00	0.00
13487	0.48	0.00	0.00	0.00	1.63	0.91	1.09	1.14	0.88	0.76	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	1.20	0.00	0.00	0.00
14130	0.02	0.00	1.44	1.07	0.88	0.97	0.95	0.96	0.80	0.81	0.97	0.00	0.00	0.00	0.60	0.70	1.01	0.00	0.00
14642	0.34	1.24	0.00	1.06	0.93	0.94	0.86	1.05	0.56	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61	0.89	1.30	1.12
14952	0.42	0.00	0.75	0.89	0.68	0.84	0.75	0.91	0.59	0.52	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.60	1.53	0.00	0.00
15677	0.52	0.89	0.00	0.90	0.68	0.78	0.88	0.84	0.57	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16130	0.64	0.90	0.89	0.89	0.62	0.84	0.96	0.83	0.59	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.77	0.86	0.44
16658	0.69	0.00	0.00	0.63	0.79	0.70	0.72	0.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.55	0.59	0.55

Figura 4.27: Agrupacions de freqüències i hores per al càlcul de les gràfiques de *composite multipath spread* (en ms)

4.10.5 Dispersió temporal

A continuació es discuteixen els resultats de les mesures de dispersió temporal expressada en termes del *composite multipath spread* (τ_c), corresponents a les jornades de l'experiment (2). Es mostraran gràfiques de $\tau(h)_{F_k, \bar{j}}$ i $\tau(f)_{H_l, \bar{j}}$ on F és un conjunt d'agrupacions de freqüències i, anàlogament, H és un conjunt d'agrupacions d'hores. Llavors F_k denota que el resultat s'ha obtingut amitjanant les observacions per totes les freqüències del conjunt F_k (és a dir, $f \in F_k$) i, anàlogament, H_l que el resultat s'ha obtingut amitjanant les observacions per totes les hores del conjunt H_l (és a dir, $h \in H_l$). L'agrupació s'ha dut a terme per tal d'incrementar el nombre de mesures amitjanades per cada resultat i obtenir així major fiabilitat estadística. El criteri per tal d'agrupar les observacions pertanyents a diferents freqüències i hores es basa en un càlcul previ de semblança entre els resultats obtinguts per cada freqüència i hora individualment. L'avaluació de la semblança entre dues mesures a partir dels factors de correlació típics (*Kendall tau*, *Spearman rho* o *Pearson coefficient* [4]) penalitza únicament les desviacions en la tendència que segueixen les dues observacions, però no considera la diferència de magnitud entre elles. Un factor de correlació que sí avalua ambdós factors (tendència i magnitud de les mesures) és el *intraclass correlation coefficient* (ICC). L'ICC es mou en l'interval $[-1, 1]$, de forma que valors elevats corresponen a similitud elevada entre les dues observacions.

A la figura 4.27 es mostren les mesures individuals (per cada freqüència i hora i amitjanades per totes les jornades) de *composite multipath spread* (en ms) i les ICC entre hores i freqüències adjacents. Enquadrades en vermell es proposen les agrupacions de freqüències i hores, escollides d'acord amb els criteris següents: (i) ICC elevat (per sobre de 0.8); (ii) Preferència per formar grups de 2 freqüències enfront a grups majors. Les freqüències 4667 KHz i 5761 KHz es descarten degut a que a cap hora s'han detectat un mínim de 5 recepcions. A la taula 4.8 es resumeixen les agrupacions realitzades.

F_k	$f \in F_k$	$\bar{f}, f \in F_k$	H_l	$h \in H_l$
1	5564	5564	1	18
2	6538	6538	2	19
3	6964, 7629	7297	3	20
4	7750, 8078	7914	4	21
5	8916	8916	5	22, 23
6	9293, 10042	9668	6	0
7	10239	10239	7	1, 2
8	10668	10668	8	3, 4
9	10986, 11411, 12209	11535	9	5
10	12785	12785	10	6
11	13230	13230	11	7
12	13487	13487	12	8
13	14130	14130	13	9
14	14642	14642	14	10, 11
15	14962	14962		
16	15677	15677		
17	16130	16130		
18	16658	16658		

Taula 4.8: Agrupacions de freqüències i hores per al càlcul de les gràfiques de *composite multipath spread*. Les freqüències estan expressades en KHz

A les figures 4.29, 4.30 i 4.31 es mostra $\tau(h)_{F_k, \bar{f}}$ (en funció de l'hora, a diferents freqüències), mentre que a 4.32 i 4.33 s'indica $\tau(F_k)_{H_l, \bar{f}}$ (en funció de la freqüència, a diferents hores). S'observa que:

- (i) Partint de primera hora de la vesprada, les diferents freqüències esdevenen disponibles amb un valor de *composite multipath spread* elevat. Per contra, cap a la matinada el pas cap a la no disponibilitat va acompanyat d'una tendència lentament decreixent de la dispersió temporal.
- (ii) Els valors màxims de dispersió oscil·len entre 2 ms i 2.5 ms, i s'obtenen en diferents circumstàncies: (ii.a) Entre les 0 UTC i les 4 UTC al voltant de 7 MHz; (ii.b) Entre les 22 UTC i les 3 UTC entre 8 MHz i 9 MHz; (ii.c) Cap a les 23 UTC entre 9 MHz i 11 MHz.
- iii Els valors mínims de dispersió es produeixen a altes freqüències: a 16658 KHz es mesura un *composite multipath spread* al voltant de 0.75 ms entre les 21 UTC i les 0 UTC, i 0.5 ms entre les 9 UTC i les 11 UTC.
- (iv) Una tendència general del *multipath* decreixent a mesura que augmenta la freqüència, variant segons les hores entre els 2.25 ms i als 0.6 ms (aproximadament). Aquest fenomen pot ser explicat per la menor atenuació que experimenten les baixes freqüències, fet que permet una major riquesa de modes en recepció.

	18	19	20	21	22	23	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11		
	0.13	0.33	0.46	0.60	0.92	0.53	0.69	0.78	0.75	0.70	0.38	0.23	-0.07	0.29	0.28	0.70	0.96	--	← Hora	
																			← ICC(h, h+1)	
4647	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5564	-0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.92	0.89	0.83	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
5741	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6538	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
6964	0.99	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.13	1.12	1.22	1.04	1.15	0.92	1.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7629	0.85	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19	0.98	1.14	1.11	0.88	0.78	1.08	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
7750	0.81	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.07	1.18	0.93	0.93	0.92	1.19	0.71	0.86	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
8078	0.57	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	1.12	1.19	1.25	1.22	1.18	1.05	0.91	1.13	0.00	0.00	0.00	0.00
8916	0.68	0.00	0.00	0.00	1.58	1.22	1.34	1.20	1.15	1.29	1.07	1.10	0.81	0.00	1.44	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
9293	0.65	0.00	0.00	0.00	0.00	1.33	1.20	1.55	1.21	1.20	1.17	1.13	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10042	0.72	0.00	0.00	0.00	1.29	1.11	1.19	1.20	1.39	1.19	1.15	1.24	0.60	1.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10239	0.50	0.00	0.00	0.94	0.06	1.42	1.31	1.21	1.33	1.11	1.09	0.89	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
10668	0.64	0.00	0.00	1.61	1.01	1.57	1.54	1.44	1.25	1.15	1.11	1.16	0.60	1.98	1.64	1.27	0.00	0.00	0.00	0.00
10986	0.96	0.00	0.00	1.05	1.14	1.67	1.46	1.32	1.54	1.12	1.05	1.14	0.60	0.00	1.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
11411	0.96	0.00	0.00	0.91	1.19	1.27	1.22	1.21	1.15	1.00	0.93	1.13	0.60	0.00	1.31	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12209	0.83	0.00	0.00	1.03	0.70	1.20	1.26	1.52	1.15	1.47	0.89	1.16	0.60	0.00	1.28	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
12785	0.81	0.00	0.90	1.05	0.89	1.25	1.33	1.35	1.13	0.93	0.57	0.64	0.60	0.00	0.91	0.62	0.00	0.00	0.00	0.00
13230	0.71	0.00	0.00	0.99	0.00	1.44	1.23	1.25	1.30	1.08	1.27	0.60	0.60	0.00	0.96	0.70	0.00	0.00	0.00	0.00
13487	0.66	0.00	0.00	0.00	1.14	1.03	1.29	1.25	0.95	1.12	1.18	0.00	0.60	0.00	0.00	0.95	0.00	0.00	0.00	0.00
14130	0.52	0.00	1.03	1.36	0.98	1.41	1.25	1.02	1.05	1.34	1.06	0.00	0.00	0.00	0.82	0.79	0.41	0.00	0.00	0.00
14642	0.67	0.73	0.00	1.42	1.14	1.12	1.30	1.15	1.20	0.89	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.50	0.62	0.74	0.74	0.74
14962	0.66	0.00	1.03	0.90	0.95	1.18	1.22	1.08	0.93	0.83	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.67	0.00	0.00	0.00
15677	0.73	1.03	0.00	0.65	0.87	1.15	1.36	1.24	0.91	0.82	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
16130	0.74	0.88	0.96	1.23	0.95	1.41	1.58	1.23	0.91	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.60	0.77	0.39	0.54	0.33	0.33
16658	--	0.58	0.00	0.00	1.19	1.43	1.60	1.52	0.78	0.00	0.00	0.00	0.60	0.00	0.00	0.00	0.50	0.80	0.71	0.71

↑ ↑
Freqüència ICC(f, f+1)

Figura 4.28: Agrupacions de freqüències i hores per al càlcul de les gràfiques de *composite Doppler spread* (en ms)

4.10.6 Dispersió freqüencial

Seguidament es discuteixen els resultats de les mesures de dispersió freqüencial expressats en termes de *composite Doppler spread* (v_c).

A la figura 4.28 s'il·lustra la repetició del procés d'agrupació de freqüències i hores, ara segons la mesura de dispersió freqüencial. Els resultats corresponents de l'agrupació s'indiquen a la taula 4.9.

A les figures 4.34, 4.35 i 4.36 es mostra $v(h)_{F_k, \bar{J}}$ (en funció de l'hora, a diferents freqüències), i a les figures 4.37 i 4.38 es mostra $v(F_k)_{H_i, \bar{J}}$ (en funció de la freqüència, a diferents hores). S'observa:

- (i) Amb poques excepcions, des de la vesprada fins a les 4 UTC - 5 UTC el *composite Doppler spread* oscil·la entre 1 Hz i 1.5 Hz.
- (ii) A algunes freqüències (entre 8 MHz i 10 MHz, al voltant d'11 MHz), hi ha una lleugera tendència decreixent de la dispersió freqüencial entre primera hora de la nit i les 4 UTC - 5 UTC, variant des d'un valor proper a 1.5 ms, fins a 1 ms. Durant aquest mateix interval horari, a altres freqüències s'observa un *composite Doppler spread* aproximadament pla (10 MHz, 12 MHz, 13 MHz, 15 MHz)
- (iii) Els valors màxims de dispersió freqüencial (descartant aquells amb poca fiabilitat) s'aproximen a 1.5 Hz: a 9293 KHz al voltant de mitjanit, 10668 KHz entre les 22 UTC i les 0 UTC, etc.
- (iv) Els valors mínims de dispersió freqüencial volten els 0.5 Hz i s'obtenen a altes freqüències, per la matinada (per exemple, entre les 8 UTC i les 11 UTC a 16130 KHz)

F_k	$f \in F_k$	$\bar{f}, f \in F_k$	H_l	$h \in H_l$
1	5564	5564	1	18
2	6538	6538	2	19
3	6964, 7629	7297	3	20
4	7750, 8078	7914	4	21
5	8916	8916	5	22, 23
6	9293	9293	6	0
7	10042	10042	7	1, 2
8	10239	10239	8	3
9	10668	10668	9	4
10	10986, 11411	11199	10	5
11	12209, 12785	12497	12	6
12	13230	13230	13	7
13	13487	13487	14	8
14	14130	14130	14	9
15	14642	14642	15	10, 11
16	14962	14962		
17	15677	15677		
18	16130	16130		
19	16658	16658		

Taula 4.9: Agrupacions de freqüències i hores per al càlcul de les gràfiques de *composite Doppler spread*

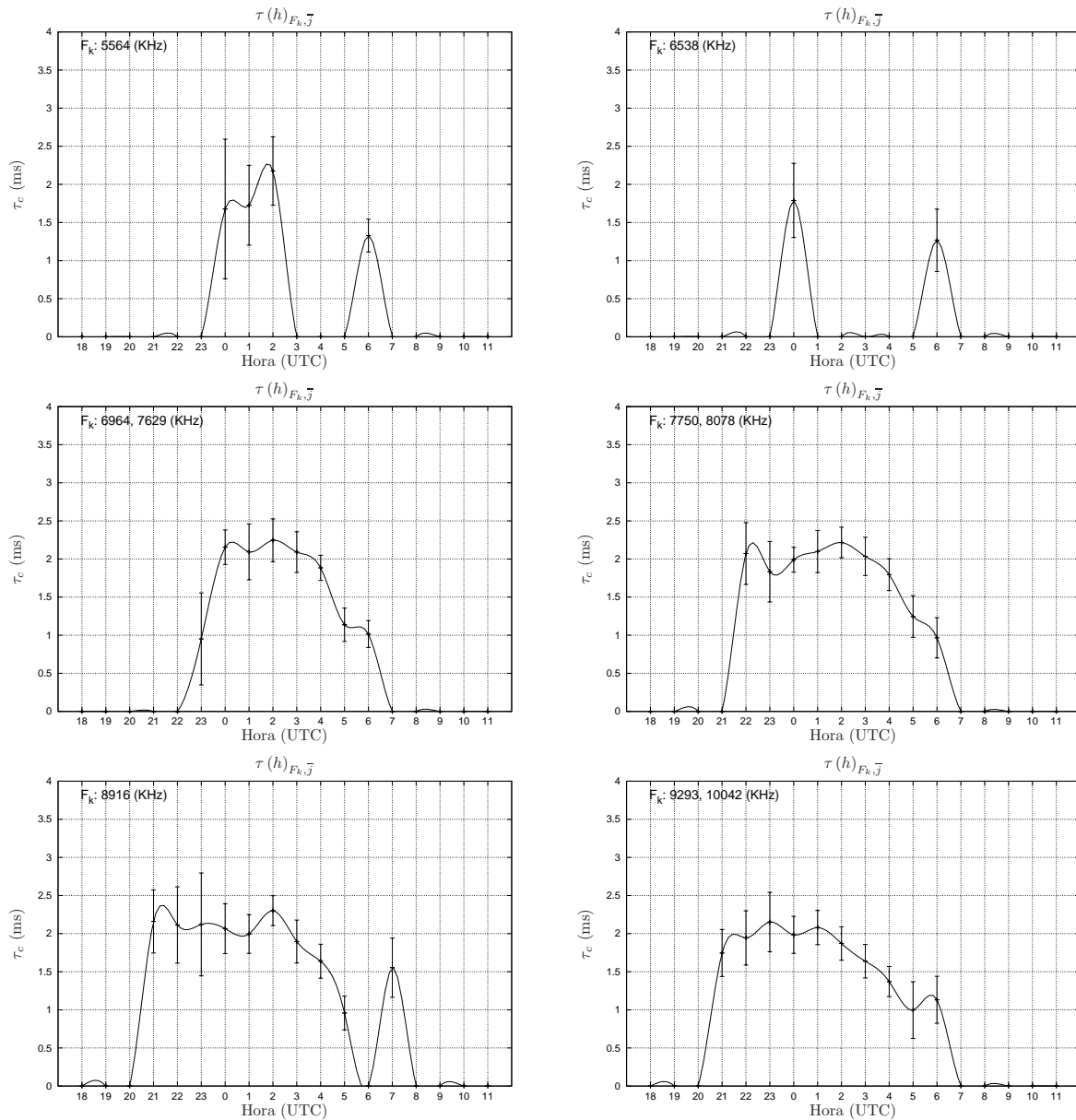


Figura 4.29: Mesura del *composite multipath spread* ($\tau(h)_{F_k, \bar{J}}$) en funció de l'hora, a diverses freqüències. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %

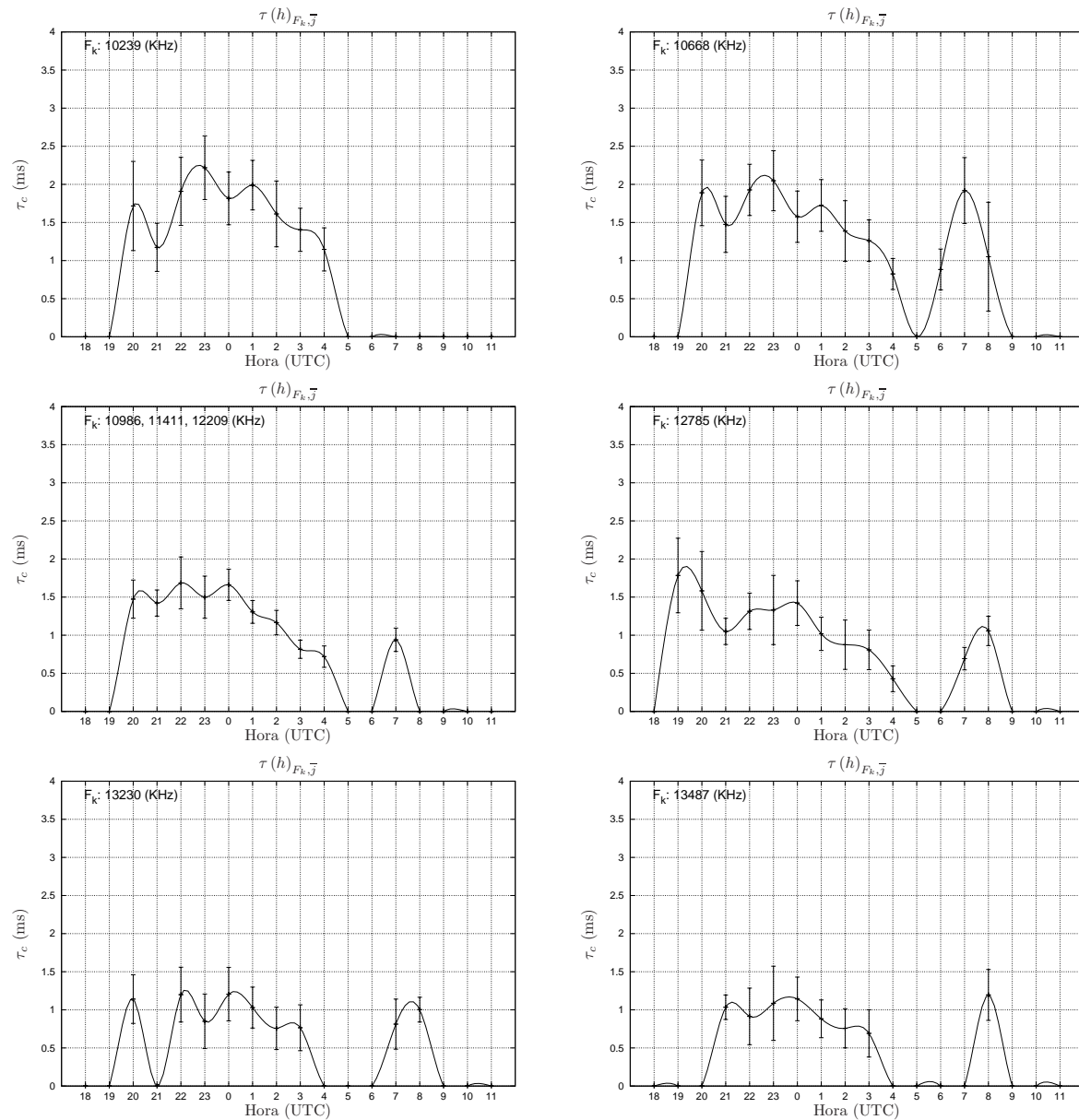


Figura 4.30: Mesura del *composite multipath spread* ($\tau(h)_{F_k, \bar{J}}$) en funció de l'hora, a diverses freqüències. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %

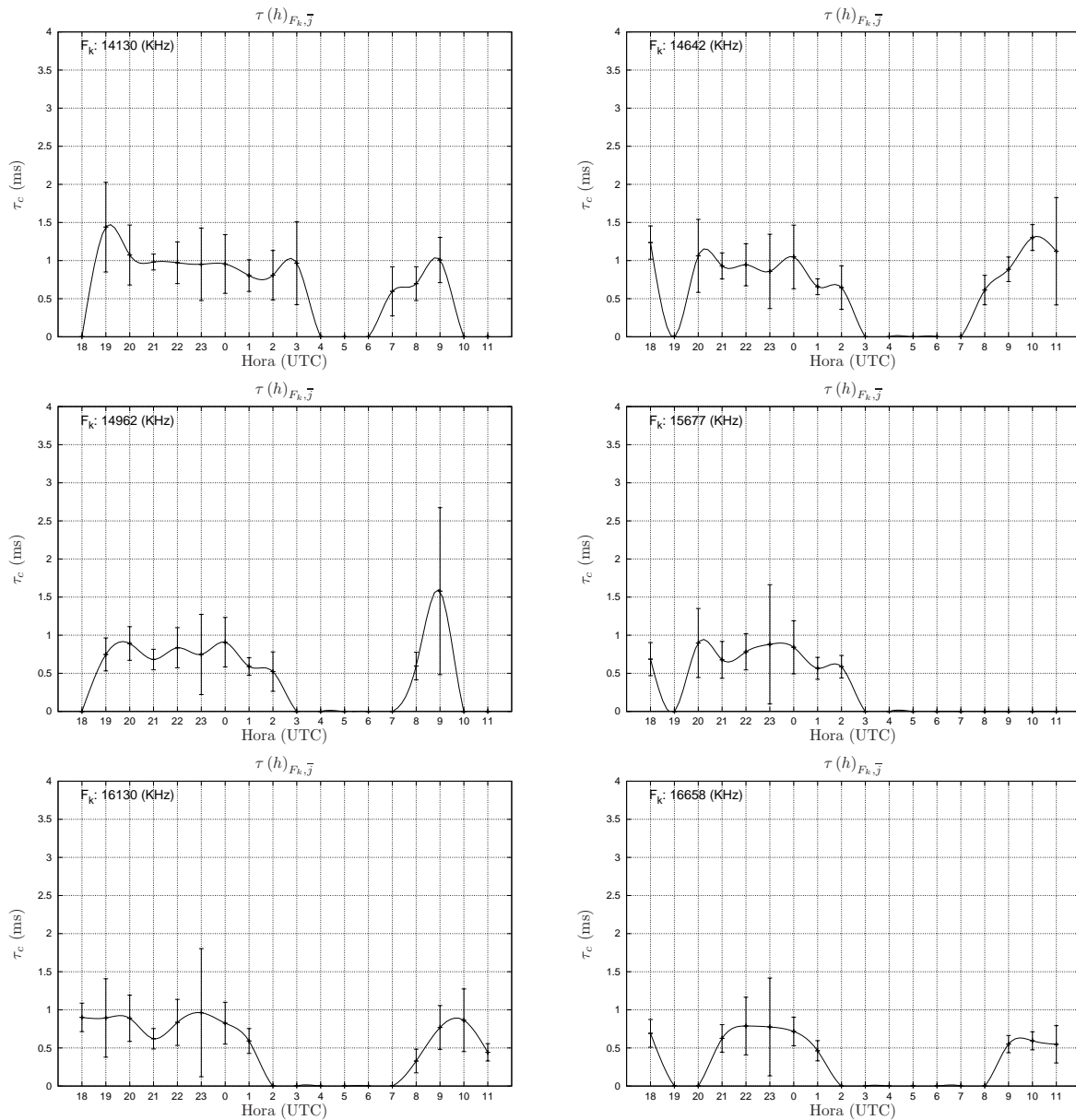


Figura 4.31: Mesura del *composite multipath spread* ($\tau(h)_{F_k, \bar{J}}$) en funció de l'hora, a diverses freqüències. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %

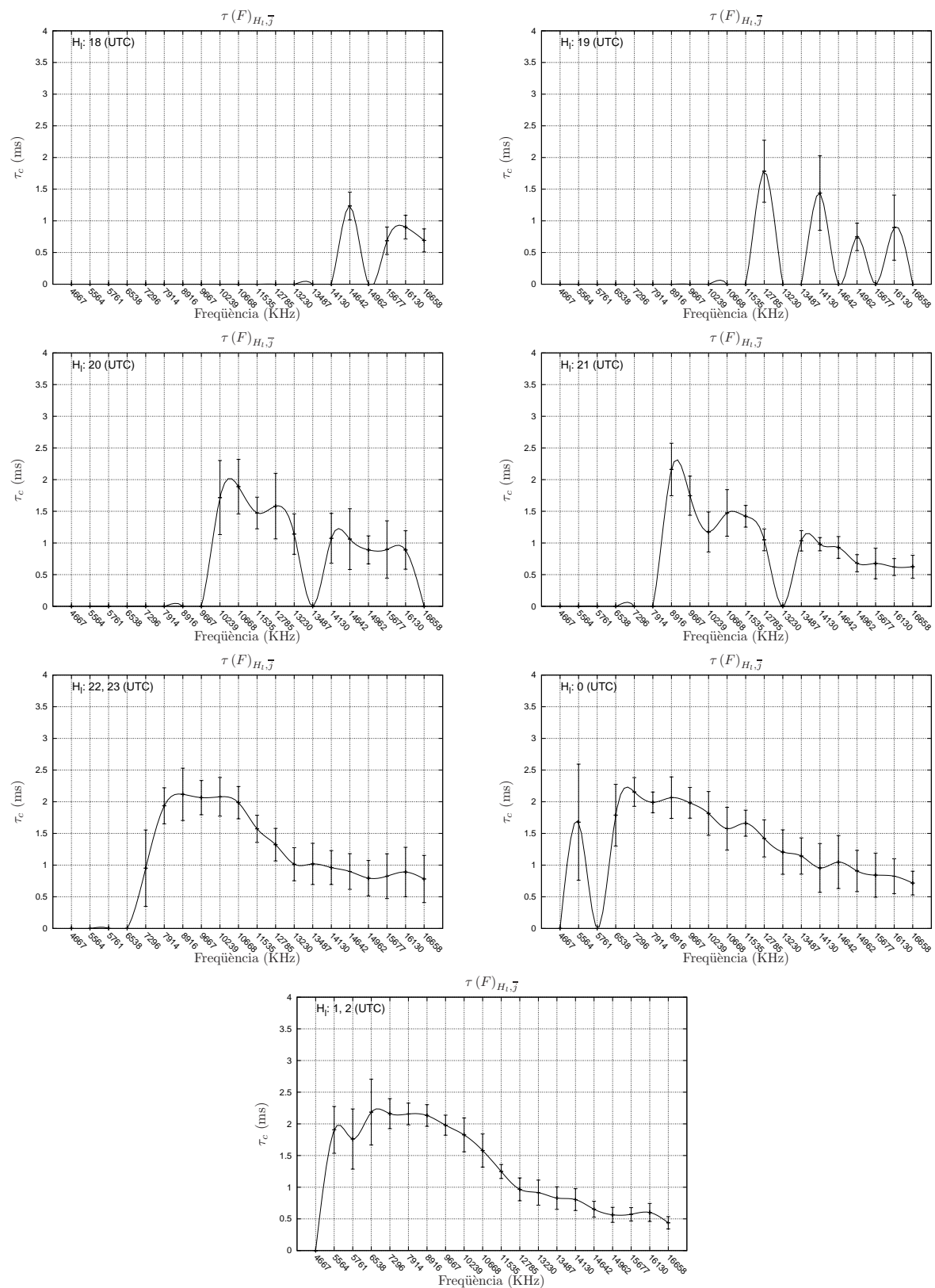


Figura 4.32: Mesura del *composite multipath spread* $(\tau(f)_{H_i, \bar{J}})$ en funció de la freqüència, a diverses hores. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %. A l'eix d'abscisses s'indica la freqüència mitjana de l'agrupació corresponent (veure la tercera columna de la taula 4.8)

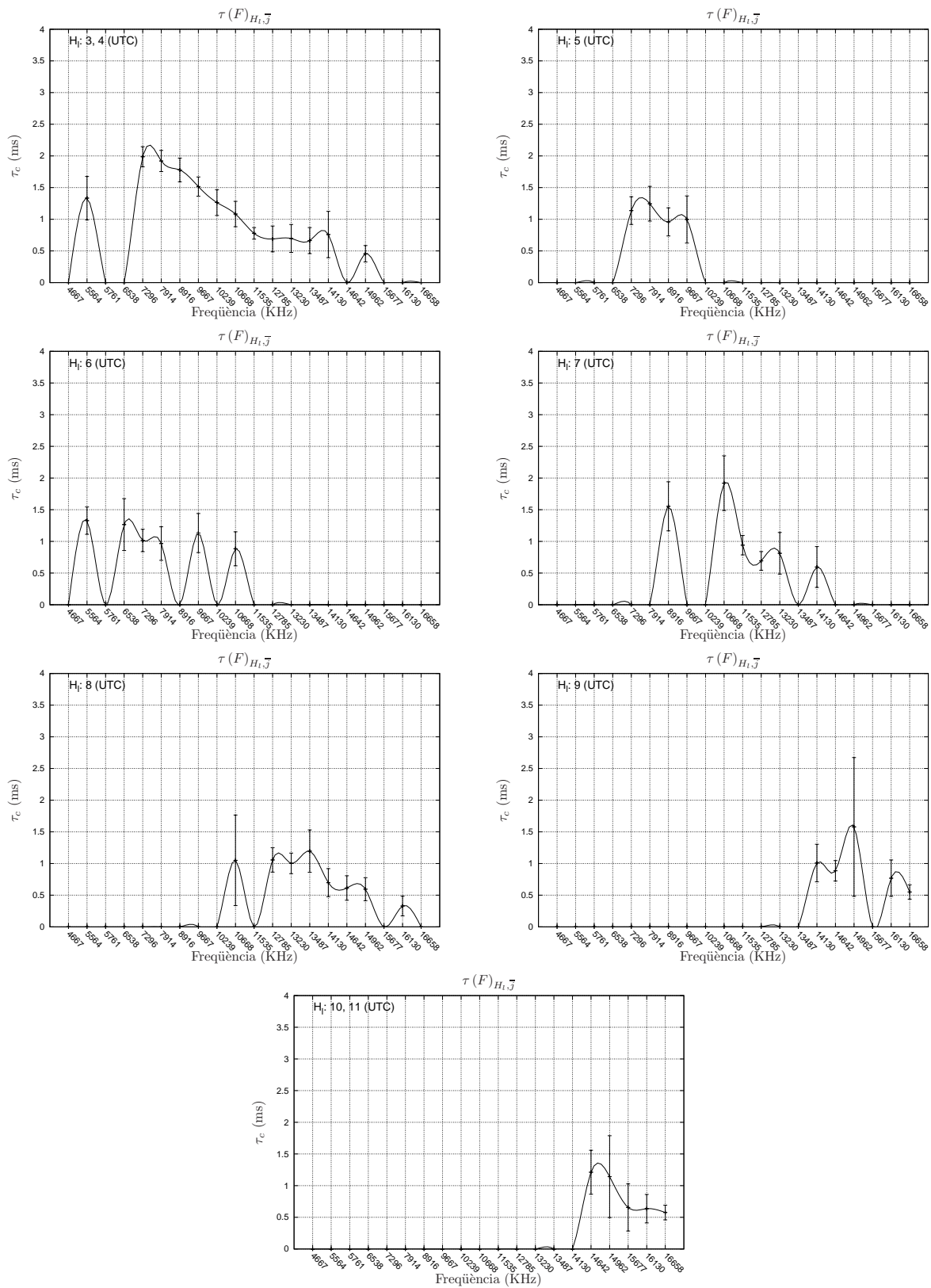


Figura 4.33: Mesura del *composite multipath spread* ($\tau(f)_{H_i, \bar{J}}$) en funció de la freqüència, a diverses hores. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %. A l'eix d'abscisses s'indica la freqüència mitjana de l'agrupació corresponent (veure la tercera columna de la taula 4.8)

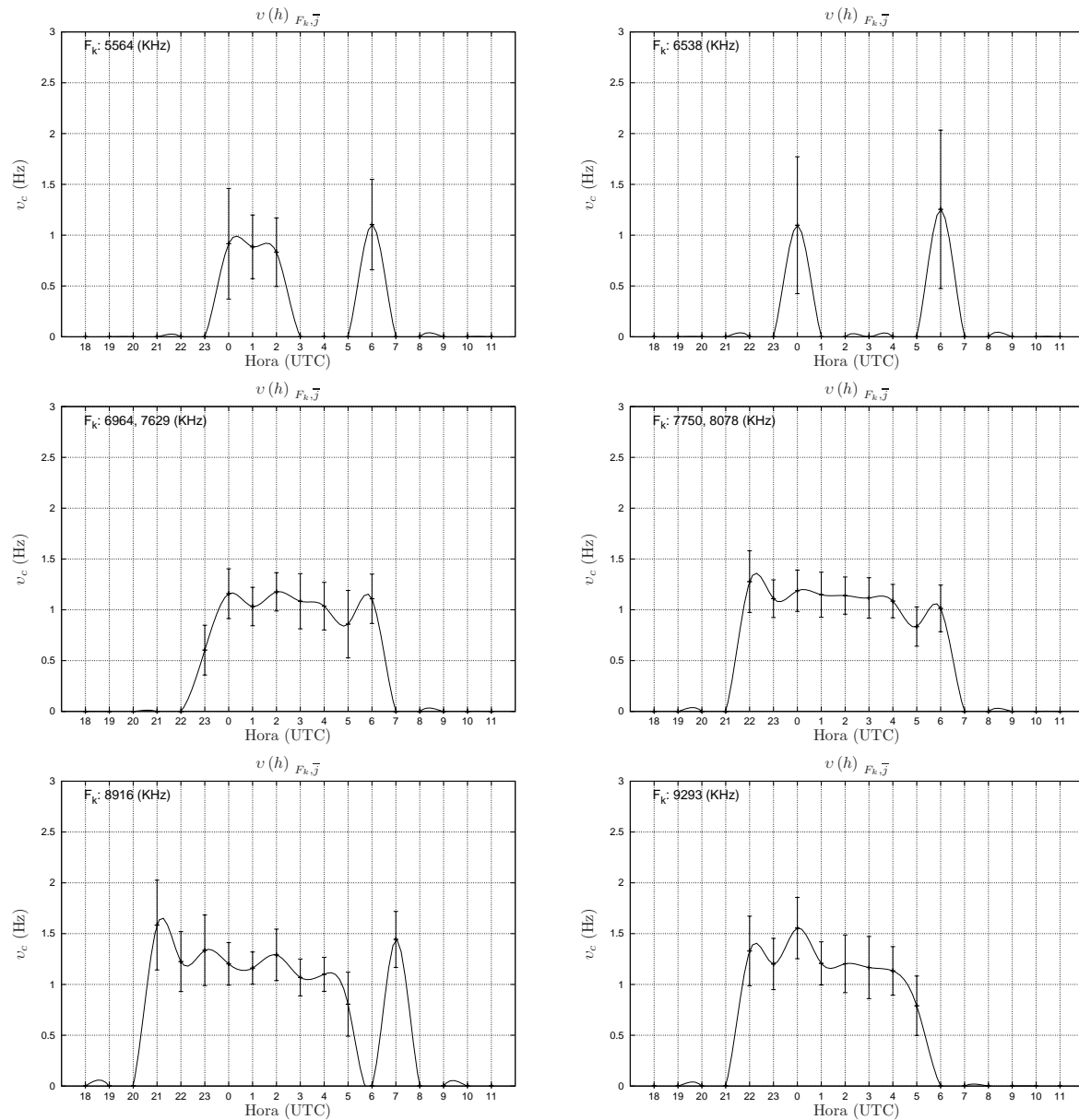


Figura 4.34: Mesura del *composite Doppler spread* ($v(h)_{F_k, \bar{J}}$) en funció de l'hora, a diverses freqüències. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %

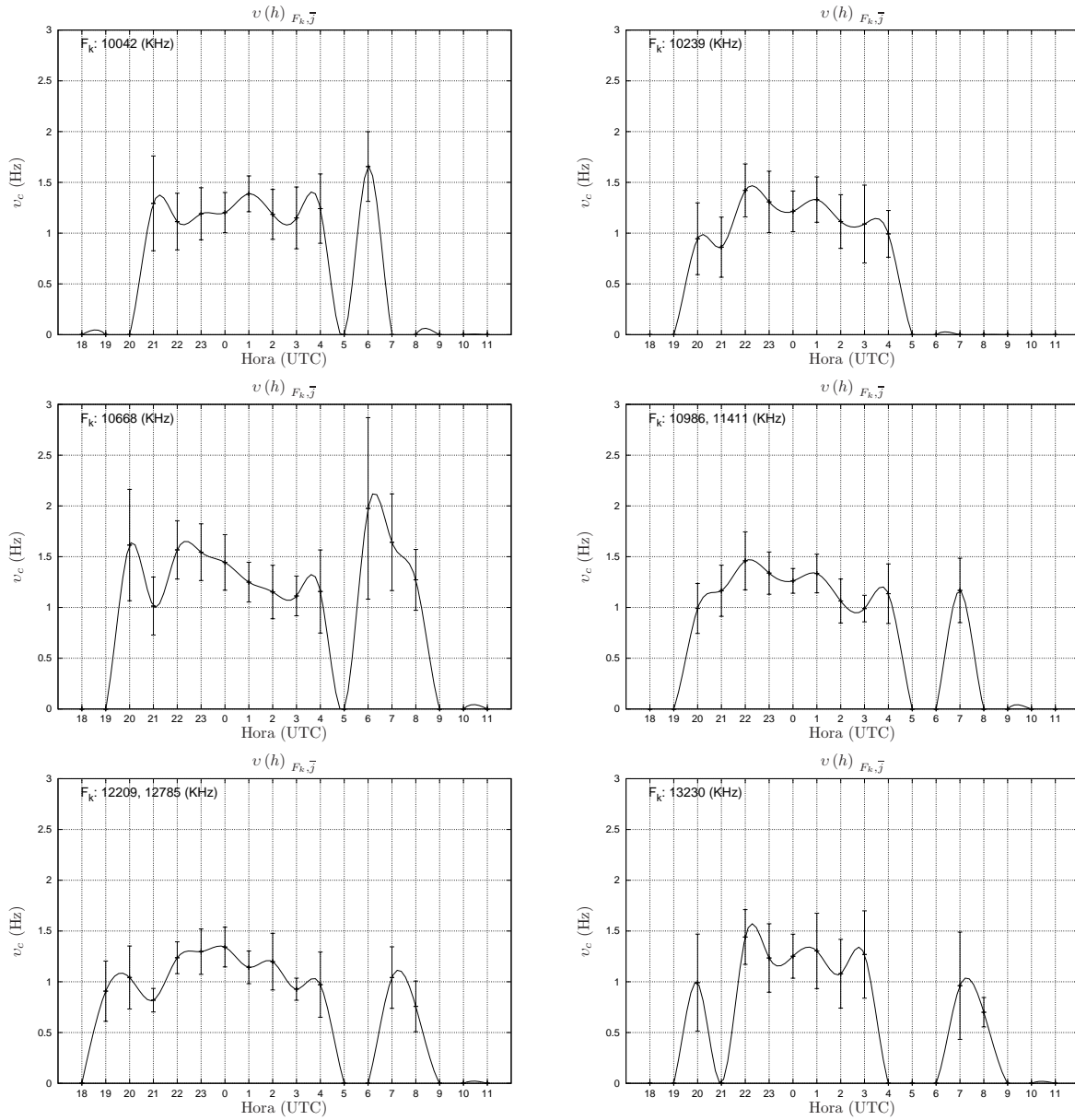


Figura 4.35: Mesura del *composite Doppler spread* $(v(h)_{F_k, \vec{J}})$ en funció de l'hora, a diverses freqüències. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %

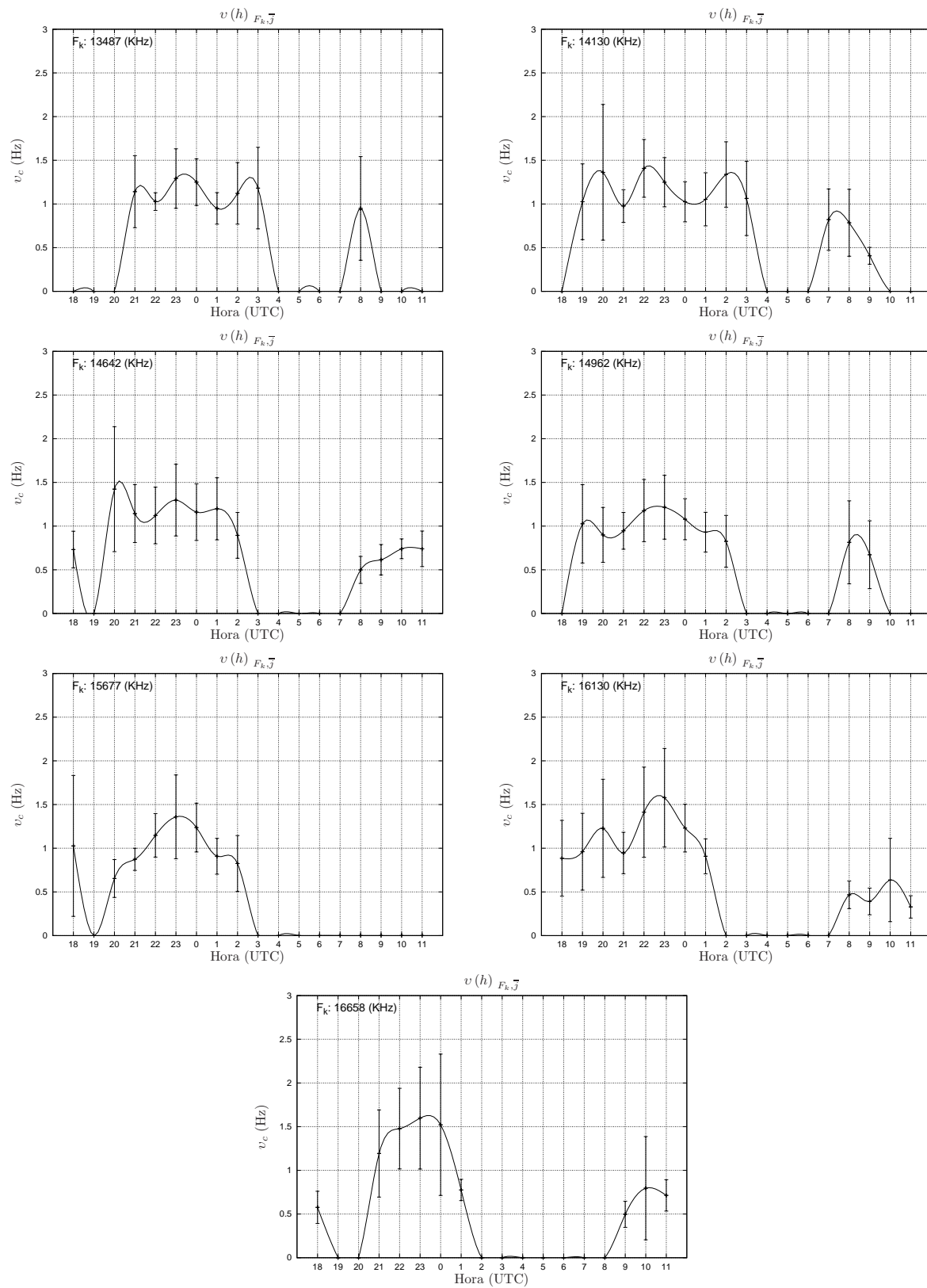


Figura 4.36: Mesura del *composite Doppler spread* ($v(h)_{F_k, \bar{J}}$) en funció de l'hora, a diverses freqüències. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %

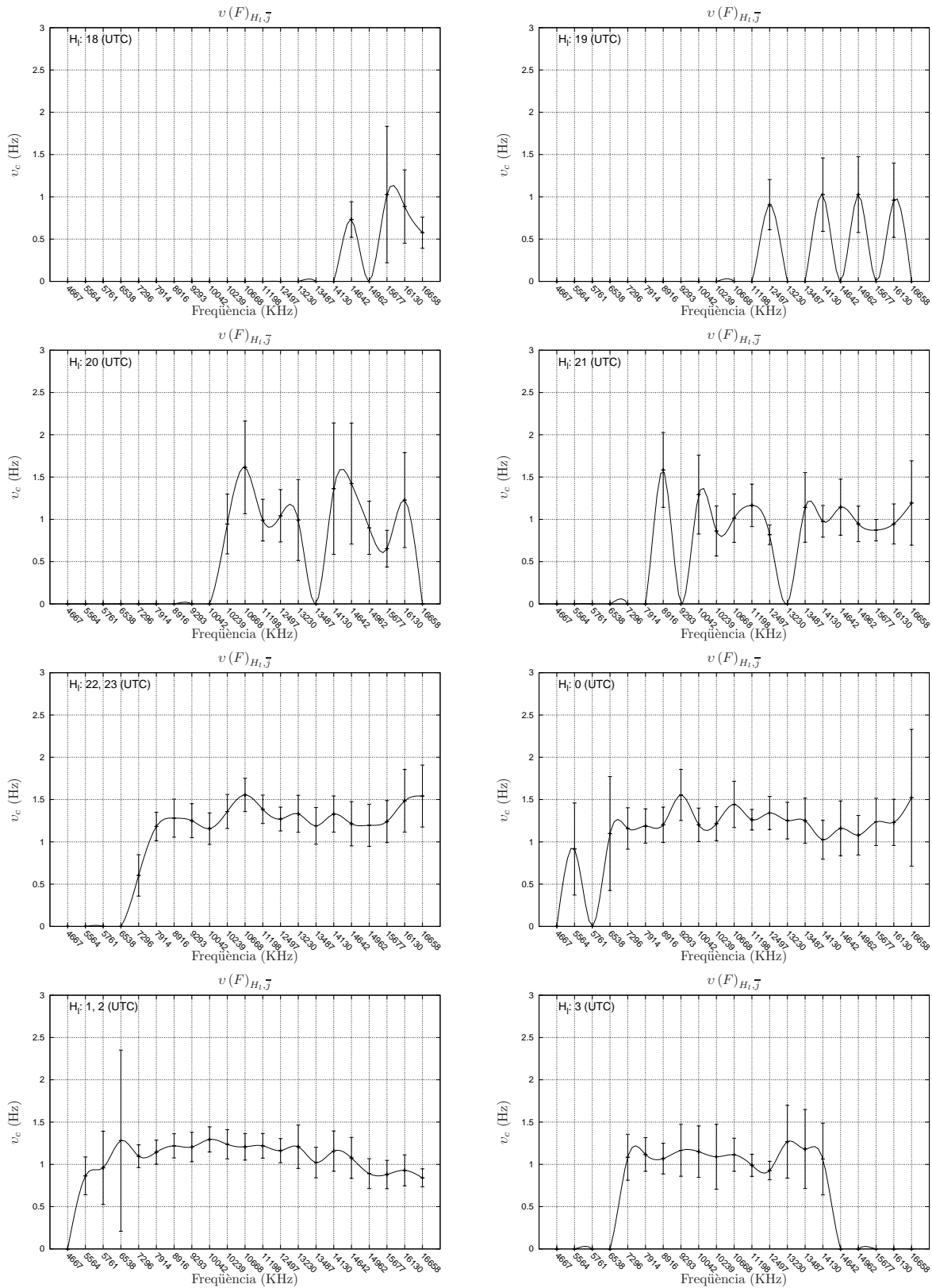


Figura 4.37: Mesura del *composite Doppler spread* ($v(F)_{H_i, \bar{J}}$) en funció de la freqüència, a diverses hores. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %. A l'eix d'abscisses s'indica la freqüència mitjana de l'agrupació corresponent (veure la tercera columna de la taula 4.9)

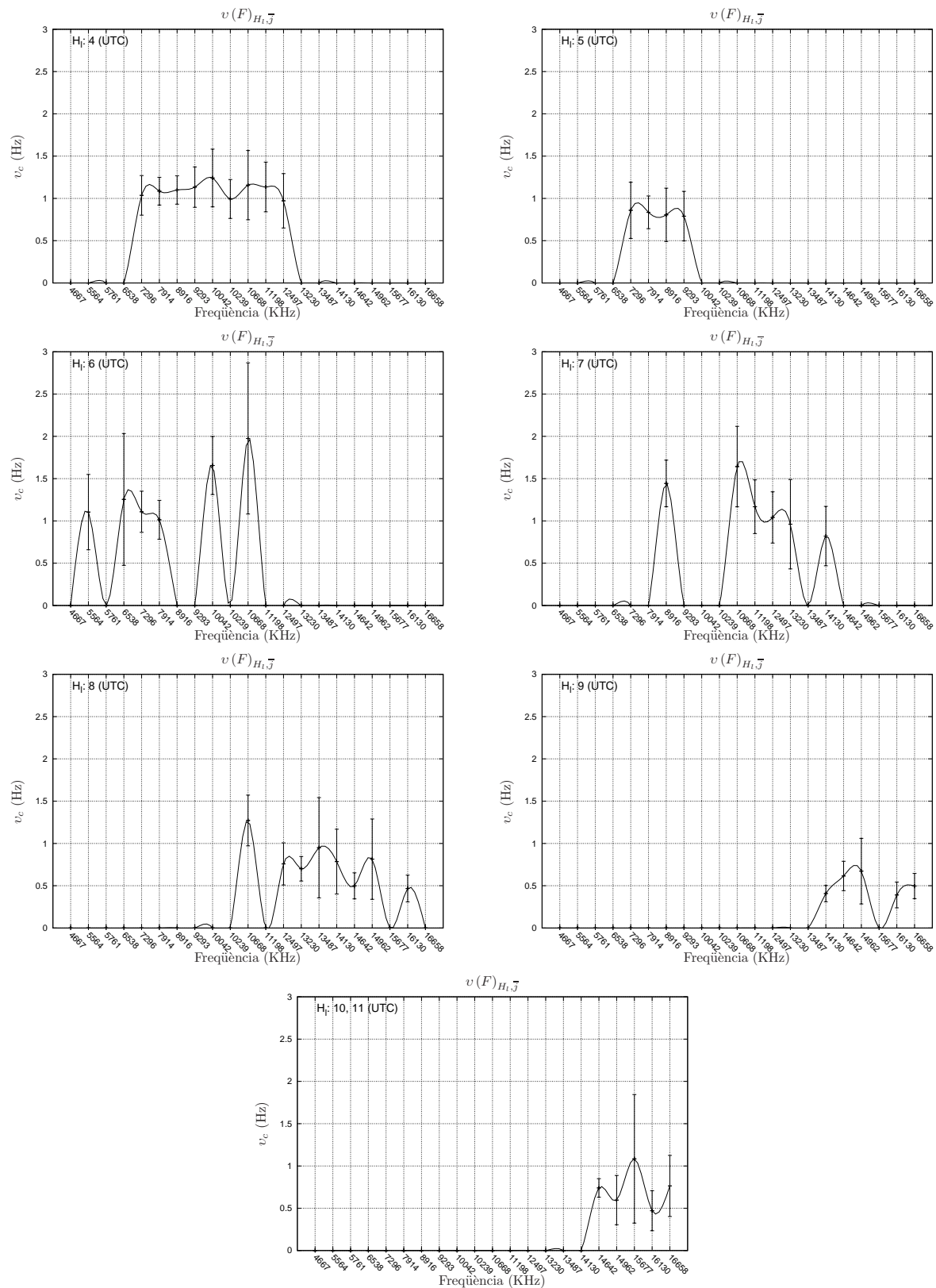


Figura 4.38: Mesura del *composite Doppler spread* ($v(F)_{H_i, \bar{J}}$) en funció de la freqüència, a diverses hores. Les barres d'error indiquen l'interval de confiança de la mitjana al 95 %. A l'eix d'abscisses s'indica la freqüència mitjana de l'agrupació corresponent (veure la tercera columna de la taula 4.9)

4.11 Conclusions

Seguidament es resumeixen les conclusions del sondeig i caracterització del canal, classificades segons si s'han obtingut a partir de l'anàlisi de banda estreta o de banda ampla. Finalment s'adjunta una taula que, tot combinant els resultats d'ambdós estudis, determina a cada hora les màximes expectatives de disponibilitat (en mitjana) i els paràmetres de dispersió corresponents.

4.11.1 Banda estreta

A continuació es recopilen les principals conclusions de les observacions derivades de l'interval de sondeig de banda estreta obtingudes mitjançant l'experiment (1).

Pel que fa a la disponibilitat de l'enllaç en banda estreta,

- Les freqüències per sobre de 12 MHz presenten una disponibilitat superior al 30 % a les 18 UTC, assolint el 60 % a partir de 14642 KHz.
- La propagació de les freqüències per sota de 12 MHz s'inicia aproximadament coincidint amb la posta del Sol en el primer punt de control de la trajectòria de l'enllaç, i s'estén progressivament arribant a 6 MHz - 7 MHz cap a les 23 UTC.
- Entre les 2 UTC i les 5 UTC la disponibilitat s'anul·la progressivament començant per 16 MHz i fins a 8 MHz - 9 MHz.
- Cap a les 7 UTC es reprèn sobtadament la propagació per sobre de 8 MHz - 9 MHz, coincidint amb la sortida del Sol a tota la trajectòria de l'enllaç.
- A partir de les 7 UTC - 8 UTC i fins a les 11 UTC, començant per les freqüències més baixes i progressivament fins a les més altes, la disponibilitat s'anul·la.
- En mitjana, la disponibilitat $dn(f, h)$ entre dues jornades s'assembla en un 77 %.
- L'estacionarietat de la ionosfera en termes de disponibilitat és màxima durant la nit.
- Es poden definir bandes freqüèncials de fins a 4 MHz amb factor de correlació de disponibilitat superior a 0.5.

Respecte a la potència rebuda, es conclou que:

- Les freqüències amb major potència màxima rebuda (mediana) són les compreses entre 7 MHz i 10 MHz (entre -90 dBm i -100 dBm). En segon lloc, les freqüències per sota de 7 MHz (al voltant de -100 dBm). Finalment per sobre de 10 MHz la potència rebuda sol estar per sota de -100 dBm.
- Tenint en compte la resposta de les antenes, s'observa menor atenuació de l'enllaç com menor és la freqüència de sondeig.

Respecte a la mesura de SNR_{Bw} , s'observa que:

- A 1 KHz d'ample de banda, hi ha una àmplia zona compresa entre 8 MHz i 13 MHz i entre les 0 UTC i les 4 UTC amb SNR entre -4 dB i 0 dB. Per sobre de 13 MHz s'aprecien aquests mateixos nivells, però més esporàdics, entre les 21 UTC i la 1 UTC. La millor SNR (mediana) és de 0.5 dB a les 0 UTC entre 10 MHz i 11 MHz.
- Es constata que per amples de banda d'aquest ordre de magnitud (1000 Hz, 3000 Hz i 5000 Hz) el soroll es pot considerar, en mitjana, distribuït de forma uniforme en freqüència (en doblar l'ample de banda, la SNR empitjora uns 3 dB).

Tenint en compte les mesures de disponibilitat, potència rebuda i SNR i les prestacions del receptor, es conclou:

- Per sota de 7 MHz a 8 MHz: (*i.a*) La potència lliurada per l'antena és moderada (l'atenuació de l'enllaç és baixa però les antenes introdueixen una atenuació elevada); (*i.b*) Durant la vesprada i el matí el receptor funciona limitat per bloqueig i interferència co-canal; (*i.c*) Durant la nit, la disponibilitat és elevada, la potència rebuda és moderada i la SNR és baixa (probablement degut a una ocupació espectral elevada).
- Entre 8 MHz i 10 MHz: (*ii.a*) La potència lliurada per l'antena és alta; (*ii.b*) La disponibilitat és elevada durant un ampli interval horari de la nit; (*ii.c*) La relació senyal a soroll és elevada. Aquesta banda freqüencial constitueix la millor alternativa entre 23 UTC i les 6 UTC.
- Entre 10 MHz i 13 MHz: (*iii.a*) La potència lliurada per l'antena baixa sobtadament; (*iii.b*) La disponibilitat és elevada durant la nit (22 UTC a 4 UTC) i a primera hora del matí (entre les 7 UTC i les 8 UTC); (*iii.c*) La SNR és moderada durant la nit.
- Per sobre de 13 MHz: (*iv.a*) La potència lliurada per l'antena és baixa, degut a l'atenuació de l'enllaç; (*iv.b*) La disponibilitat és moderada durant el vespre i la nit (20 UTC a 4 UTC) i pel matí (entre les 7 UTC i les 11 UTC); (*iv.c*) La SNR és moderada durant la nit i pel matí (probablement degut a la baixa ocupació espectral); (*iv.d*) En aquest marge freqüencial el receptor funciona limitat per interferència co-canal i sensibilitat. Aquesta banda freqüencial constitueix la millor alternativa per la vesprada (abans de les 22 UTC) i pel matí (a partir de les 7 UTC).

Comparant la mesura de la disponibilitat en banda estreta (D_n) i la SNR_{Bw} es conclou que:

- Entre 8 MHz i 12 MHz (aproximadament) l'elevada disponibilitat en banda estreta (al voltant del 80 % entre les 22 UTC i les 03 UTC) va acompanyada de SNR comparativament molt bones (entre -3 i 2 dB a 1 KHz d'ample de banda)
- Per sota de 8 MHz, tot i que la disponibilitat en banda estreta és elevada (per sobre del 60-70 % en una franja horària àmplia durant la nit) la SNR és comparativament molt pitjor a la d'altres bandes freqüencials amb disponibilitat similar (vegi's, per exemple, al voltant de 12 MHz).
- Per sobre de 13 MHz la SNR mesurada és comparativament millor a la d'altres bandes amb disponibilitat similar o millor (vegi's, per exemple, al voltant de 6 MHz).

S'han avaluat les freqüències que maximitzen la disponibilitat en banda ampla a cada hora ($Dw_{f,h,\bar{j}}$). Destaquen les observacions següents:

- Per un requeriment de $SNR_{min,3000}$ baix en termes relatius (-9 dB) s'observa una tendència general marcada per: (i) En un ampli marge d'hores de la nit (des de les 23 UTC fins a les 6 UTC, ambdues incloses) la millor freqüència en termes de disponibilitat volta els 8 MHz - 9 MHz. A més, entre les 23 UTC i les 4 UTC la disponibilitat màxima supera el 60 %; (ii) Abans de les 23 UTC i després de les 6 UTC, les millors freqüències són més altes (a partir de 13 MHz - 14 MHz). Per la vesprada, la disponibilitat és major com més a prop de la nit (al voltant del 50 % a les 21 UTC a 13 MHz i del 45 % a les 22 UTC a 15 MHz), i per la matinada assoleix el màxim a les 8 UTC (sobre el 50 % a 15 MHz).
- Per un requeriment de $SNR_{min,3000}$ relativament elevat (0 dB) la màxima disponibilitat volta el 30 % a les 21 UTC a 15 MHz. A plena nit s'assoleixen valors entre el 10 % i el 25 % a freqüències lleugerament superiors al cas anterior ($SNR_{min,3000} = -9$ dB). Els nivells de disponibilitat són, però, molt baixos i en conseqüència les conclusions que se'n puguin treure són poc fiables en termes estadístics.
- Aquestes mateixes consideracions (excepte pel que fa als percentatges de disponibilitat) són majorment extrapolables a altres valors de $SNR_{min,Bw}$ (-6 dB, -3 dB i 0 dB) i Bw (1000 Hz i 6250 Hz). En tot cas, a mesura que $SNR_{min,Bw}$ augmenta s'observa un corriment de les millors freqüències cap a bandes més altes entre les 22 UTC i les 00 UTC.

4.11.2 Banda ampla

A continuació es resumeixen les conclusions de les observacions derivades de l'interval de sondeig de banda ampla corresponent a les 21 jornades de l'experiment (2).

Pel que fa a la dispersió temporal i freqüencial,

- Entre 7 MHz i 10 MHz: (i) El *composite multipath spread* volta els 2 ms entre les 20-21 UTC i les 03 UTC, essent major a freqüències menors. Llavors el *composite Doppler spread* és bastant pla (més a 8 MHz que a 10 MHz), de valor una mica superior a 1 Hz; (ii) Entre les 4 UTC i 8 UTC s'observen alts i baixos tant de la dispersió temporal com freqüencial. Entre les 5-6 UTC el *composite Doppler spread* assoleix valors màxims d'1.5 Hz a 10 MHz.
- A partir d'11 MHz: (i) Des de primera hora de la vesprada (18-19 UTC) fins a les 4 UTC s'observa una lleugera tendència descendent del *composite multipath spread*, partint de valors diferents segons la freqüència (1.5 ms a 11 MHz i 0.8 ms a partir de 15 MHz). Llavors la dispersió freqüencial volta l'1 Hz abans de les 5 UTC, amb oscil·lacions més pronunciades a darrera hora de la vesprada i primera hora de la nit (fins a les 22-23 UTC); (ii) A partir de les 6 UTC la dispersió temporal tendeix a créixer, arribant a valors de 1.5 ms al voltant de 13 MHz cap a les 9 UTC. Llavors la dispersió freqüencial és la més baixa de la jornada, assolint valors al voltant de 0.5 Hz per sobre de 14 MHz.

Des d'un altre punt de vista, podríem distingir dos tipus d'interval horaris:

- Un primer interval, que qualificaríem d'estable, comprès aproximadament entre les 23 UTC i les 4 UTC, caracteritzat per un *composite multipath spread* lentament decreixent

en freqüència i hora (a partir dels 8 MHz) i un *composite Doppler spread* aproximadament pla. Aquest interval horari correspon, a grans trets, al període de temps en que la major part de la ionosfera que intervé en el trajecte de l'ona no està il·luminada. Valors típics amitjanats d'aquest interval serien d'1.5 ms i 1 Hz (respectivament).

- Un segon interval, que qualificaríem d'instable, que inclou la vesprada (abans de les 23 UTC) i la matinada (a partir de les 5-6 UTC), on sovint s'experimenten alts i baixos en els valors de dispersió temporal i freqüencial. Aquests intervals horaris corresponen a canvis en la il·luminació solar de porcions de la ionosfera que estan dins el trajecte de l'ona.

4.11.3 Taula resum

A la taula 4.10 es mostra, a mode de resum, les freqüències que maximitzen la disponibilitat en banda ampla a cada hora, per tres SNR mesurades en un ample de banda de 3 KHz. En cada cas, s'inclouen les mesures de dispersió temporal i freqüencial.

h_l	$SNR_{min,3000}$	$Dw(h_l)_{\underline{f},\bar{j}}$	$f_k = \underline{f}$	$\tau(h_l)_{F_k,\bar{j}}, f_k \in F_k$	$v(h_l)_{F_k,\bar{j}}, f_k \in F_k$
19	-9	15 %	16	0.8	1
	-6	-	-	-	-
	-3	-	-	-	-
20	-9	27 %	15	0.9	0.7
	-6	18 %	15	0.9	0.7
	-3	13 %	15	-	-
21	-9	52 %	13	1	1.2
	-6	43 %	15	0.7	0.9
	-3	36 %	15	0.7	0.9
22	-9	46 %	15	0.8	1.25
	-6	43 %	15	0.8	1.25
	-3	27 %	15	0.8	1.25
23	-9	60 %	9	2.1	1.2
	-6	38 %	9	2.1	1.2
	-3	20 %	11	1.6	1.3
00	-9	73 %	9	2.1	1.5
	-6	54 %	9	2.1	1.5
	-3	34 %	11	1.5	1.3
01	-9	82 %	9	2	1.25
	-6	63 %	9	2	1.25
	-3	36 %	9	2	1.25
02	-9	68 %	9	2	1.25
	-6	50 %	9	2	1.25
	-3	25 %	9	2	1.25
03	-9	77 %	9	1.6	1.2
	-6	55 %	9	1.6	1.2
	-3	30 %	11	1	1
04	-9	66 %	9	1.6	1.2
	-6	42 %	9	1.6	1.2
	-3	30 %	9	1.6	1.2
05	-9	32 %	8	1	0.8
	-6	20 %	9	1	0.8
	-3	11 %	9	1	0.8
06	-9	26 %	8	1	1
	-6	16 %	8	1	1
	-3	11 %	8	1	-
07	-9	21 %	14	0.6	0.8
	-6	18 %	13	0.8	0.95
	-3	11 %	14	0.8	0.95
08	-9	50 %	15	0.6	0.8
	-6	36 %	15	0.6	0.8
	-3	18 %	15	0.6	0.8
09	-9	32 %	15	1.5	0.7
	-6	14 %	15	1.5	0.7
	-3	-	-	-	-
10	-9	17 %	16	0.6	0.75
	-6	10 %	16	-	-
	-3	-	-	-	-

Taula 4.10: Llista de freqüències que maximitzen la disponibilitat ($Dw(h_k)_{\underline{f},\bar{j}}$) a cada hora, per tres valors de SNR (-9 dB, -6 dB, -3 dB) mesurada a $Bw = 3000$ KHz. La freqüència està expressada en *MHz*, el *composite multipath spread* en *ms* i el *composite Doppler spread* en *Hz*. No es mostra cap informació quan la màxima disponibilitat és inferior al 10 %

Bibliografía

- [1] M. J. Angling, P. S. Cannon, N. C. Davies, T. J. Willink, V. Jodalen, and B. Lundborg, "Measurements of doppler and multipath spread on oblique high latitude HF paths and their use in characterizing data modem performance," *Radio Science*, vol. 33, no. 1, pp. 97–107, Jan-Feb 1998.
- [2] M. J. Angling and N. C. Davies, "An assessment of a new ionospheric channel model driven by measurements of multipath and Doppler spread," in *Proc. of the IEE Colloquium on Frequency Selection and Management Techniques for HF Communications*, Apr 1999.
- [3] P. A. Bello, "Characterization of randomly time-variant linear channels," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 11, no. 4, pp. 360–393, Dec 1963.
- [4] G. Canavos, *Probabilidad y estadística. Aplicaciones y métodos*. McGraw-Hill, 1994.
- [5] D. C. Cox, "Delay Doppler characteristics of multipath propagation at 910 mhz in a suburban mobile radio environment," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 20, no. 5, pp. 625–635, Sep 1972.
- [6] K. Davies, *Ionospheric radio*. Peter Peregrinus, 1996.
- [7] "Digital broadcasting below 30 MHz: DRM - a summary of the field trials," European Broadcasting Union, Abr 2007. [Online]. Available: http://www.ebu.ch/trev_296-briggs.pdf
- [8] T. J. Fitzgerald, P. E. Argo, and R. C. Carlos, "Equatorial spread F effects on an HF path: Doppler spread, spatial coherence, and frequency coherence," *Radio Science*, vol. 34, no. 1, pp. 167–178, Jan-Feb 1999.
- [9] A. J. Gibson, U. M. Yilmaz, Y. Tulunay, C. B. Erol, A. Özgü, and T. Ata, "Characteristics of fading of HF signal and noise intensities of three paths between the United Kingdom and Turkey," *Radio Science*, vol. 30, no. 3, pp. 649–658, May-Jun 1995.
- [10] J. Goodman, J. Ballard, and E. Sharp, "A long-term investigation of the HF communication channel over middle- and high-latitudes paths," *Radio Science*, vol. 32, no. 4, pp. 1705–1715, Jul-Aug 1997.
- [11] J. D. Parsons, *Mobile radio propagation channel*. John Wiley and Sons LTS, 2000.
- [12] R. L. Peterson, R. E. Ziemer, and D. E. Borth, *Introduction to spread spectrum communications*. Prentice Hall, 1995.

- [13] J. G. Proakis, *Digital communications*. McGraw-Hill, 1995.
- [14] S. V. B. Rao, T. R. Rao, V. G. Reddy, D. R. Lakshmi, B. Veenadhari, R. S. Dabas, I. Ahmed, and M. M. Gupta, "HF radio signal fading and atmospheric radio noise measurements at low latitudes," *Radio Science*, vol. 37, no. 5, 2002.
- [15] J. V. Rees, "Measurements of the wide-band radio channel characteristics for rural, residential, and suburban areas," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 36, no. 1, pp. 2–6, Feb 1987.
- [16] "Cuadro nacional de atribución de frecuencias," Secretaría de Estado de Telecomunicaciones, Mar 2006. [Online]. Available: <http://www.mityc.es/Telecomunicaciones/Secciones/Espectro/cnaf/>
- [17] C. Vilella, D. Badia, J. L. Pijoan, M. Deumal, M. Ribó, and J. R. Regué, "On site receiver testing. Application to long distance HF links," in *Proc. International Symposium on Electromagnetic Compatibility EMC Europe 2006*, Sept. 2006.
- [18] C. Vilella, D. Miralles, J. C. Socoró, J. L. Pijoan, and R. Aquilué, "A new sounding system for HF digital communications from Antarctica," in *Proc. International Symposium on Antennas and Propagation*, Aug. 2005.
- [19] C. Vilella, J. C. Socoró, D. Miralles, J. L. Pijoan, and P. Bergadà, "HF channel measurements for digital communications from Antarctica," in *Proc. International Ionospheric Effects Symposium*, May 2005.
- [20] C. Vilella, J. C. Socoró, J. L. Pijoan, I. Gutiérrez, and D. Altadill, "An Antarctica to Spain HF Link. Oblique Sounding Results," in *Proc. Ionospheric Radio Systems and Techniques*, July 2006, pp. 91–94.
- [21] L. S. Wagner, J. A. Goldstein, M. A. Rugar, and E. J. Kennedy, "Delay, Doppler, and amplitude characteristics of HF signals received over a 1300-km transauroral sky wave channel," *Radio Science*, vol. 30, no. 3, pp. 659–676, May-Jun 1995.
- [22] E. M. Warrington and A. J. Stocker, "Measurements of the Doppler and multipath spread of the HF signals received over a path oriented along the midlatitude trough," *Radio Science*, vol. 38, no. 5, 2003.