



**This article was published in an Elsevier journal. The attached copy is furnished to the author for non-commercial research and education use, including for instruction at the author's institution, sharing with colleagues and providing to institution administration.**

**Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.**

**In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:**

**<http://www.elsevier.com/copyright>**

Received 14 December 2006; accepted 16 March 2007; accepted 17 March 2007

I a c c a a e e , h a e e a e a b e e e c e a e e a d c g e e e c e e g e g a e h e a e d e d  
 a g e e e c h f h e b a c g d c e a . A h e c g e e e g h e e e h a f h e a g e e e c h e e  
 c a a e d e h e e c g f h e e a g a h e h e a g e e e c h a d c e g e e c h a e e e e d a h e a e  
 e . H e c e , e d g e f c e ( c e c g ) e e e c h e c g h e h e e e a e a g . I a d d , f a a  
 e d g e f h e c e c h a a c e c f h e a g e a e c d a h e h e e e a e d h e a g e a e h e h e a e a e  
 e e . T h e e e d e g a e d h e e e h c h a c g e e e c e ( c e c g ) a d a e c e a e e c e ( c e c g )  
 c a e d d e c a f e e c h a e d b e b h e e e c h C h e e e e . S e c c a , e e e e e e d  
 h a f a e e c e e e b e f e a e e c e a e e a e d h e e e c e f e h e e e e e c h . T h e g e e c e a a a  
 h e a e c e a h e a g e e e c e . T d f e e e e g a e d : a e e e c e e , a d d e e - e e c e e .  
 U d e e e c h - a g c d , e a c h f h e e e g c a e d e c g f h e e d h e f e g h  
 a g e e e c e . U d e e - a g c d , a e e e c e e h a d a e a b g c a e a g e e c , b d e e - e e c e  
 e h a d a e g g b e e a g e e c . T h e e e g g e h a a d d c e c e , c e c e c a b e e d b C h e e  
 e e e a e e e c h f a g b h e a e .

© 2007 Elsevier B.V. All rights reserved.

**Keywords:** Speech; Infants; Emotions; Cognition; Verbal

U de e g c d , e e a d  
d c c ehe d a d a c a e c e a ,  
e ec a he e e a e a g, ch a a c c -  
a a e . T a fac a e h gh  
c b e h d c : (1) e e ge c a g f he  
a ge eech b - a ge d , a d (2) f a a  
e fe e ce f e a a e ( f a a a -  
g, A b ga e a, 2002; B ga , 2001; B ga a d  
S , 2002; D ach e a, 2003; F e a e a,

☆ Pa f h d a e ed a he 4 h ee g f he  
Ac ca S ce f A e ca a d he Ac ca S ce f Ja a .

\* C e d g a h . Add e : De a e f P ch g , Na a .  
Ke Lab a Mach e Pe ce , S eech a d Hea g Re ea ch  
Ce e , Pe g U e , Be g 100871, Ch a. Te: +86 10 6275 6804;  
fa: +86 10 6276 1081.

E-mail addresses: [la\\_ga@ed.ac.uk](mailto:la_ga@ed.ac.uk), [la\\_ga@ca-ga2@h.ac.uk](mailto:la_ga@ca-ga2@h.ac.uk) (L. L).

1999, 2001, 2004; K d d e a , 1994, 1998; L e a , 2004;  
 L , 1990; O e ha e a , 2003; Sh -C gha  
 e a , 2005; S e a d M , 2004; W e a , 2005).  
 E e ge c a g cc he e he a e a ac  
 e c ed b a g a e he ed b ha e c ed b a -  
 e , ead g a deg aded e a e e e a f  
 he g a a g d c f b e e c g e -

♀abe ♀e ♀be e f . He ce, he e ♀e  
 be g ea e e - - e a a he f da-  
 e a f e c ( $F_0$ ) a Ma da Ch e e e a ce,  
 he e each ♀abe ha ch c , ha a  
 E g h e a ce, he e he ch c e f  
 ac ♀abe . I e ha a e d e h  
 e ec h  $F_0$  cha ge d ga e a ce ( he  $F_0$  c -  
 ), a d ha d e e ce  $F_0$  c be ee a a ge  
 a e a d c e g a e ca fac a e ac g f he  
 a ge a e he he e a e c e g a e (A a  
 a d S e ed, 1989; Da a d H , 2000; Da  
 e a, 2003). He ce, beca e he e g ea e a ab ♀  
 he  $F_0$  c Ch e e ha E g h, he ef ♀e  
 f h c e a d e ac he ♀a g age .  
 I add , c e a Ma da Ch e e, a a ge  
 be f d a e -cha ac e c d d  
 h ch each f he cha ac e ( ♀abe ) ha  
 e a c e e e a . F e a e, he Ch e e  
 d f “Be g” a - ♀abe (/Be 3/ a d /J gl/)

he e e e a d e e a d a d e e d f he  
a c a .

## 2.2. Apparatus

L e e e e e a d a c h a a h e c e e f a a e c -  
h c h a b e (B e g C A A c c ), h c h a 560 c  
e g h, 400 c d h, a d 193 c h e g h . A a c c  
g a e e d g e d a h e a g a e f 22.05 H<sub>i</sub> g  
h e 24-b C e a f e S d B a e P C I 128 ( h c h a d a b  
a - a a g a e ) a d a d e d g f a e (C e d  
P 2.0), d e h e c f a c e h a P e  
I V c e . T h e a c c g a e e d e a d a d  
e a e (D a d A c c , B M 6 A), h c h a h e  
f a a h a a e a 0° ( h e e c h e  
e d a e ). T h e d e a e h e g h a 106 c , h c h  
a a a e a e a e f a e a e d e e h a e a g e  
b d h e g h . T h e d a c e b e e h e d e a e a d h e  
c e e f h e a c a ' h e a d a 185 c .

## 2.3. Stimuli

### 2.3.1. Chinese nonsense sentences

S e e c h a e e C h e e " e e " e e c e .  
D e c E g h a f h e e e c e a e a  
b d e c a h e E g h e e e e c e h a  
e e d e e d b H e f e (1997) a d a d e d e  
b F e a e a (1999, 2001) a d L e a (2004). E a c h  
f h e C h e e e e e e c e h a h e e c -  
e : b e c , e d c a e , a d b e c , h c h a e a h e  
h e e e d , h c h a c e f e a c h (a e e  
a b e f e a c h c a c e ). N e h a h e e e c e f a e d e  
d e a c e a f e c g f h e  
e d .

B a d h e d a b a e f h e C h e e e a e  
P e o p l e ' s D a i l y b h e d e 9 e a (1994 2002), 6000  
d b e - a b e e b , h c h e e a e d a h a g h g h f e -  
e e c e f c c e c e , a d 12,000 d b e - a b e ,  
h c h e e a a e d a h a g h g h f e e c e f c c -  
e c e , e e e d . T h e d e e c b e d a d  
6000 a c c a c c e e e c e h h e f a e f  
s u b j e c t + p r e d i c a t e + o b j e c t . T e h a e e c e d  
e e e e e e a g f h e b a b f  
c - c c e c e f h a e b a a e -  
e c e a d e e d a c c d g h e d a b a e f P e o p l e ' s  
D a i l y e 9 e a . O e e e c e h e b a b f c -  
c c e c e f e d h e d a b a e a e e e d  
a h e e e e c e f h e e e d . S c e C h -  
e e a a a g a g e , f h e e c a a d e b a  
a c e a b e e a c e e c e . A d b e - a b e  
a h e a c e d b e f e a , a d a a a  
e b a a c e d b e f e a e b , a g a e c e d e e c e  
e a a F a a , a e e c e e e e a e d b h e  
e e e e e h a e c e d e e c e e e  
e c a .

B h a g e e e c h a d d e e - e e c e c g e e c h  
e d h d e e e b a g f e a e a e

(T a e A). M a g e e c h a a c e c d g  
f a g C h e e e e e e c e a e a  
e b h e g f e a e a e (T a e B a d  
C). T a e B a d T a e C e d e e a g e -  
e c e . A a e e c h e e e c d e d d g a c -  
e d , a e d a 22.05 H<sub>i</sub> a d a e d a 16-b P C M  
a e e .

T e - f (18 e e c e / ) f e e e -  
e c e e e e d a a g e e e c e . T b a c e f a -  
e a a c e e e a c d h  
d , h e f a e a f a e d a e e c e  
a c a e d a

$$I = g \left( \frac{1}{f} \right)$$

h e e f d f e e c . I f a e a f a e -  
e c e a h e f f a e a e f h e h e e  
e d . A a h e f e e e e c e e e c -  
c e d c h a a h a h e f a e a f  
e a c h a a b h e a e . I a a g e e e c e ,  
h e a e d a c e d d g e e c h e c g  
e g . T e a e h e e e c e h e e c a d b ,  
a a e e c e e e e c a e d h a e h e a e R M S a e ,  
a d a a e e c e (b h a g e a d c g) e e e e d  
a h e a e d e c b e e e (52 d B A).

I h e a e - e e c e c g c d , h e e , h c h  
a e b T a e A , a d e c a h e a g e e -  
e c e e c e h a h e e d a e a c e d b a h e  
e b , h e d a a e a h a f h e g e  
f h e a (h d) e d a h e a g e e e c e , a d  
h e e e a 10 d B e (b h e e c e a d e e e  
e a e d d B A) h a h a f h e e c e d g e e c e  
(f g F e a e a , 2004). I h e d e e - e e c e  
c g c d , a e e e e e c e , h e c e a  
d e e f h a f h e a g e e e c e , a a e  
b T a e A , h a h e a e c ( c a d g h e e a c e -  
e f h e a e d h h e e ) b e g d e c a  
h e a e - e e c e c g c d (F g. 1). O e h d e d  
a d f - f e e e e c e e e e d a d e e -  
e e c e c g e e c h a e a . F g. 1 h h e a e f  
f e f h e a g e e e c e , h e a e - e e c e e ,  
a d a d e e - e e c e e , e e c e e .

### 2.3.2. Speech-spectrum noise

T h e h d e d f e e c c g a b e e e c h -  
e f h e d a b a e f P e o p l e ' s D a i l y b h e d f e  
e a . O e h d e d a d h e e e e c e , h c h a e a e d  
P e o p l e ' s D a i l y a d c a e d 317 a b e c a d g a  
h e 300 f e e c c g a b e , e e e c e d a  
a c c a e a f a g e e c h - e c e . T h e  
113 d e e e e c e e e a g e d 50 C h e e g  
f e a e e a e . F f - e e e e c e e e e b 25  
e a e a d 56 h e e e c e e e e b a h e  
25 e a e a a e d a e f e e c h . R e c d g f h e  
e e c e e e e d d g a c e d , a -  
e d a 22.05 H<sub>i</sub> a d a e d a 16-b P C M a e e .  
A a f h e 50 - c e e e c e e e e d g M a a b

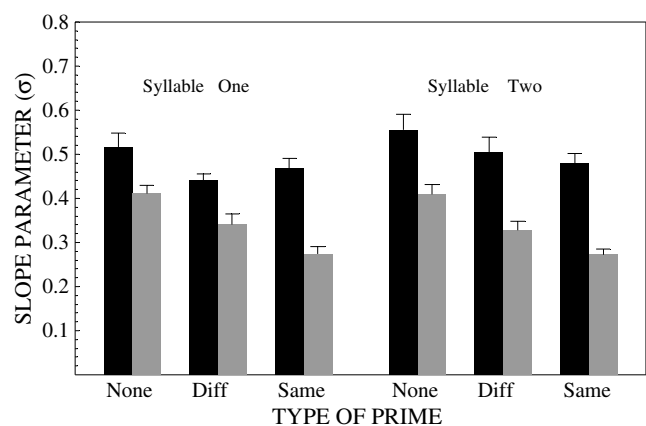




f e c ed a g ca e ec f g e  
 ( $F[2,34] = 24.719$ ,  $p = .000$ ), b e ec f **ab**  
 ( $F[1,17] < 1$ ) a d **ab** b e e ac  
 ( $F[2,34] < 1$ ). He ce, he he a e a e, he e ec  
 f he g c d a he a ef **ab** e a d  
 . Pa e t-e (B fe c ec ed) d ca ed ha  
 he - e c d d d d e g ca **f**  
 he d e e - e e ce e ( $t[17] = 2.177$ ,  $p > .05$ ), b  
 ha d d d e f he a e-e e ce e  
 ( $t[17] = 7.081$ ,  $p < .001$ ), a d ha he d e e - e e ce  
 e d e ed g ca **f** he a e-e e ce e  
 ( $t[17] = 6.434$ ,  $p < .001$ ). He ce, he he a e a  
 e, he e a e a e f a g he a a e-e  
 e ce e a ed, b he a d e e - e e ce  
 e a ed.

The **ae** ANOVA f he eech a e f d  
 g ca a e ec f **ab** ( $F[1,17] = 1.447$ ,  
 $p = .246$ ) b d d d g ca e ec f g  
 ( $F[2,34] = 22.173$ ,  $p = .000$ ), a d a g ca **ab**  
 $\times$  g e ac ( $F[2,34] = 15.570$ ,  $p = .000$ ), d-  
 ca g ha he e ec f g a ge f **ab**  
 ha a f **ab** e. M **ae** t-e (B fe -  
 c ec ed) c ed ha, f he **ab**, he  
 - e c d d e ed g ca **f** he  
 g c d ( - e d e e - e e ce e,  
 $t[17] = 3.078$ ,  $p < .05$ ; - e a e-e e ce e,  
 $t[17] = 4.610$ ,  $p < .001$ ), b ha he  
 d d d e g ca **f** e a he  
 ( $t[17] = 2.470$ ,  $p > .05$ ). H e e, t-e (B fe c -  
 ec ed) h ed ha **ae** h e e g c d d e ed  
 f e a he f **ab** ( - e d e e -  
 e e ce e,  $t[17] = 3.484$ ,  $p < .01$ ; - e a e-  
 e e ce e,  $t[17] = 6.864$ ,  $p < .001$ ; d e e - e e ce  
 e a e-e e ce e,  $t[17] = 4.336$ ,  $p < .005$ ).  
 M **ae** t-e (B fe c ec ed) a c ed ha  
 a h gh he d e e ce be ee he - e a d d e e -  
 e e ce e a he a ef **ab** e a a f  
**ab** ( $t[1,17] = 2.218$ ,  $p > .05$ ), he d e e ce  
 be ee - e a d a e-e e ce e a **ae**  
 f **ab** ha f **ab** e ( $t[17] = 5.010$ ,  
 $p < .001$ ), a a he d e e ce be ee he d e e - e -  
 e ce a d a e-e e ce e ( $t[17] = 3.302$ ,  $p < .05$ ).  
 He ce, b h d e e - e e ce e a d a e-e e ce  
 e d ce a e a e f eech a g, h  
 a e-e e ce e d c g a **ae** e a e ha d f-  
 fe e - e e ce e, a d he d e e ce be ee  
 e a d a e-e e ce e, a d he d e e ce  
 be ee d e e - e e ce a d a e-e e ce e be g  
**ae** f **ab** ha f **ab** e.

**Fig. 4** d ca e h he **ae** a a e e,  $\sigma$ , a ed h  
 a e e a d g c d f **ab** e a d  
 f he a ge d. I ge e a **ae** e e ha e  
 he he a e a eech ha he he a e a  
 e. I a a ea ha **ae** e e e he he e  
 e ha he he e a e. A hee-fac,  
 h - bec ANOVA c ed ha he e a a g -  
 ca a e ec f a e ( $F[1,17] = 86.348$ ,  $p = .000$ ),



**Fig. 4.** A e age **ae** a a e e ( $\sigma$ ) a a f c f he e f a e  
 a d e f e f **ab** e (ef) a d **ab** ( gh). S **ae**  
 b a c e a g e e e he da a f he e a e; **ae** e c a g e  
 e e he da a f he eech a e. E b a d ca e he a da d  
 e f he ea.

a g ca a e ec f g c d ( $F[2,34] =$   
 $12.989$ ,  $p = .000$ ), b a e ec f **ab** ( $F[1,17] =$   
 $2.305$ ,  $p = .147$ ). The **ae** e ec ha a ached  
 g ca ce a he e ac be ee a e a d **ab**  
 ( $F[1,17] = 4.118$ ,  $p = .058$ ), h ch **ae** be c e h  
 he b e a ha he **ae** d e e ce be ee eech  
 a d e a e gh be **ae** **ae** ge f **ab**  
 ha f **ab** e. M **ae** t-e (B fe c -  
 ec ed) h ed ha **ae** he g c d e e  
 ee e ha h e he d e e - e e ce g c d -  
 ( $t[17] = 3.33$ ,  $p < .05$ ), a d h e he a e-e e ce  
 g c d ( $t[17] = 4.72$ ,  $p < .001$ ); b ha **ae**  
 he d e e - e e ce g c d d d d e g-  
 ca **f** h e he a e-e e ce g c d  
 ( $t[17] = 1.65$ ,  $p > .05$ ).

**Fig. 5** a d b h h h e h d a d **ae**, e ec-  
 e, cha ge a a f c f a e e a d g  
 c d, he he h e d (b h **ab**) a  
 c de ed. **Fig. 5** gge ha h e h d a e **ae** f  
 eech a e ha f e a e, a d ha, a  
 a he ca e f he he **ab** e e c de ed  
 e a a e, he h ghe h e h d cc he he e a  
 e, f **ae** ed b he d e e - e e ce e, h  
 he **ae** h e h d cc g h he a e-e e ce  
 e. A -fac, h - bec ANOVA c ed  
 ha he e a a g ca e ec f a e ( $F[1,17] =$   
 $69.698$ ,  $p = .000$ ), a g ca a e ec f g  
 c d ( $F[2,34] = 18.379$ ,  $p = .000$ ), b g ca  
 e ac be ee a e e a d g c d  
 ( $F[2,34] < 1$ ). M **ae** t-e (B fe c ec ed) d-  
 ca ed ha a g c d d e ed g ca **f**  
 f e a he ( - e d e e - e e ce e,  
 $t[17] = 2.895$ ,  $p < .05$ ; - e a e-e e ce e,  
 $t[17] = 5.877$ ,  $p < .001$ ; d e e - e e ce e a  
 e e ce e,  $t[17] = 3.618$ ,  $p < .01$ ). He ce, h e h d  
 e e **ae** f eech a e ha he e e f e  
 a e, a d **ae** he e e e g e, d ca g



ha he e ded a ea ef a g. I add-  
 , he a f ea ef a g a ge f  
 a e- e e ce ha f d ee - e e ce e .

**Fig. 6** gge ha he e he h e d c d-  
 ee ha e he he a e a eech ha he  
 a e, a d ha he ee a ha e he a  
 e a ee ed. A -fac , h - bec  
 ANOVA c ed ha he e a a g ca a e ec  
 f a e e ( $F$ )

bab f c ec de f g he he abe a  
c d .

## 4. Discussion

U de each f he c d he e e d , e -  
ce -c ec d de ca c ea ed ca  
h he c ea e f SNR f 12 dB 0 dB, h  
d a g a ea . The ab e ce f c he  
b h he a ge a d he - a e eech a e e e e  
ce ed be e a a gf he a e a ca agee-  
e h he e e ed b B ga e a (2001),  
F e a e a (2001), L e a (2004), a d W e a (2005).  
A c e h he e e (e.g., B -  
ga , 2001; F e a e a , 1999; L e a , 2004; W  
e a , 2005), he e f he e e d h ha  
he e f he ch e cf c f d de ca-  
a e ge e a ee e f he e a e ha he a e  
f he eech a e . O e e , a a ha beca e  
he e c de abe a a he e e g e e e f  
he eech a e , he a a e SNR h gh he  
he e a a e ced c a he a g  
eech, a d he a a e SNR he c g  
cc he a g eech. The e ec f he e c a-  
a ca SNR d be a e he ch e c  
f c f a eech a e a c a ed a ead - a e  
e a e , a d ca ed he f Rhebe ge a d  
Ve fe d (2005) a d Rhebe ge e a (2006). (A ee d -  
c be d e e ce be ee Ch e e eech a d  
E g h eech).

#### 4.1. The effects of priming in a noise masker

The e f he e d h ha a a e e e e  
e d ce a a ge ea ef a g ha a d e -  
e - e e ce e he he h e d c de ed. I  
add , hea f ea e d e a a e - e e ce e  
a a a e he a ef a b e (1.34 dB) a  
a f a b e (1.36 dB), a d a gh a e  
(1.10 dB) he he h e d a c de ed. S e e e  
ee e he e a e e ed ha he e he a  
d e e - e e ce a e - e e ce e a g e . He ce,  
he g ca e ec b e ed f e a e  
ha b h d f e ca ead a ea ef a g  
he de f l dB he he h e d c ed, a d ha  
he e f he ch e c f c a e ha e he  
a e g e .

#### 4.2. The effects of priming in a speech masker

Whe he a e a eech, he d c f a  
 e (e he a e- e e ce d e e - e e ce) -  
 d ced a ed c ▲ e f b h nabe e a d na-  
 be , a d f h e d c g. M e e , he e e e  
 d e e ce ▲ e be ee nabe e a d .  
 He ce, he he a e eech, he a e ec f  
 g ed ce he ▲ e f he ch e c f c .

[illegible]

The c e a e d e e c e e f a e w a b e  
 h e a e- e e c e g c d d b e e, e c e d f a  
 c e c d e c a f w a b e e c e a e d h e e, e-  
 h d f c e c d e f g w a b e . I d e e d,  $\chi^2$  e  
 d c a e d h a h e e c d w a b e a e e, e e b e c -  
 e c d e e d f h e w a b e e c e d g a c e c d  
 d e e d. H e c e, a e, e c e d, h e e c d w a b e e  
 e a d e e d h e h e w a b e c e c d e -  
 e d. P e a b, h e c e c d e c a f h e w a-  
 b e e d c e h e e a c h e g h b h d f h e e c d  
 w a b e, h e e b f a c a g h e e c e e f h e g  
 a a c g e- e e

[illegible]

O e b e e a f he g ea e e ea e he  
he d d a a b e he c d d a e c ed

ha d, edge f he c e f he e e ce ca de  
ce a c e a a c g e e (ch a g he he  
a ge d cc) he he e d c -  
e e a ed b a a e (ee Fg. 2).

He ce, ba ed he e e e e ha a  
a e e e ce e e e e ec beca e edge  
f he c e f he a f he e e ce a d d ec-  
g a a h ghe - de c g e e e S ec ca,,  
edge f he a f he e a ca -a a  
e e ce a he d d a ac he ce ha  
d c g he e e e ce. A e ed b Fe a e a  
(2004), g he a ge - a e' ce (fe a e), a a e'  
ce, a f e e he a e - e e ce e  
ca e he a e a f e e e ec g g  
he e d he f a ge eech e e ce (ab  
4 dB) he he a e a - a e eech, d ca g  
ha he e ec a c e - c g e ec. Beca e h  
c g e ec a ea be de e de f he ce f he  
ea e a d he de f e e a (a d a d a  
e b h ead a g), he c g  
e a e e g e ce a a ce a (c g e) e e  
a he ha a a a d e e H e e, he c e  
d h ha g he e e h he ce f  
he a ge e e ce (b e e g a d e e - e e ce  
he a e ce) ead a e a e f a -  
g f Ch e e e e. He ce, edge f he cha ac-  
e c f a ea e' ce fac a e d ec g  
beca e ead be e eg ega f he a ge a e'  
ce f c e g a e' ce a a e ce a e e  
He ce, f de a d he a e f a g Ch-  
e e a ed E g h, e eed e a e h c-  
a d e e ce be ee Ch e e a d E g h ca a ec he  
deg ee h ch e e he a g age a be e  
f fac h ch h d d ce a e a e f f a-  
a a g. Cea, e e eed h e ec  
h e.

The e e d a h ha he g a  
g e, he h e h d f ec g g he e d a  
e 1 dB e f a eech a e ha f a e a -  
e. O e gh ha e e, ec ed a g ea e deg ee f a g  
b a eech a e ha b a e a e (Fe a e a,  
1999, 2004; L e a, 2004), a e a e deg ee f  
a g b he e a e (W e a, 2005), ce he  
eech a e ha b he e ge c a d f a a -  
g e ec a d he e a e ha e e ge c a g  
a. H e e, a g ea e deg ee f c a he e e-  
e f he Ch e e eech a e ha he E g h  
eech a e a ha e ade ea e f he Ch e e a -  
c a e, ac a ge f a (ee be). The ea-  
f h ha ha bee h ha e e ca  
be e f gh (e a ga) he a e he  
e g eech (G af a d A ge, 1994; H -  
a d - J e a d R e, 1993; Ne e a, 2003; S e  
a d M, 2004). If he Ch e e eech a e ed he e  
ha dee e a d de gh ha he E g h eech a -  
e, Ch e e e e ha e a g ea e  
be e f e g he gh ha d E g h e -

e. I deed, a c a f dee gh f e e e  
be ee he Ch e e - a e eech a e ed  
he e e d a d he E g h - a e eech a e  
(Fe a e a, 2001, 2004; L e a, 2004) d ca e ha  
he e a ea be a g ea e deg ee f a de d a-  
he Ch e e e e ha he E g h e e e,  
a d he d a f he Ch e e gh a ea be  
a ge ha h e f he E g h gh.<sup>1</sup> He ce, Ch e e  
e e gh d ea e hea he a ge eech he  
e e ce f c e g eech ha a e a e f  
a a e beca e f he g ea e de h a d d a  
f he gh he Ch e e eech a e e e ed  
he e ha he E g h eech a e ed e  
de (Fe a e a, 2001, 2004; L e a, 2004). I  
a e, h e e, ha a be f fac, ch  
a eech a e, a ec he f e c a d de h f  
gh a a g age. He ce, a e ca a ha he Ch -  
e e eech a e e ed he e had dee e gh ha  
he E g h eech a e (ee Rhebe ge a d Ve fed,  
2005 a d Rhebe ge e a, 2006, f a d c f he e  
f gh he a g f eech b eech).

A a a, a a ga he d g h he a -  
ge a d d ec e e a e a d he a ge, a  
he e g ega e a ge eech f c e g eech (B -  
ga, 2001; Fe a e a, 2004; K dd e a, 2005a,b).  
B ga a d c eage (B ga, 2001; B ga e a,  
2001) e ed ha he a a ge h a e a a ed b  
e e e c e g h a e a e, f a a

<sup>1</sup> T a f ea a d gh, e f a e ec ed 47 ec d  
a e f b h he - a e E g h eech a e, h ch e e ed  
he d b Fe a e a (2001, 2004) a d ha b L e a (2004), a d  
he - a e Ch e e eech a e ed he e e d, bef e  
a g he h gh a 20 H e e, ac he a de e e f  
b h E g h a d Ch e e eech a e. The e a de e e e  
e e he hed g a r - e g a e age e ded b  
Ma he a ca (W f a Re ea ch,  $r = 500$  a e). The hed  
a e e he g a a d a c e e f c (Ma he -  
a ca, W f a Re ea ch). Th e f c a he d e e -  
a ed d he a ca he e he de a e f he e e ed  
f c a e, .e., he a ca f he ea a d gh he  
a de e e. I he fa h gh he a de e e e e  
de ed.

T gh he eech a e a e e e be ef a e g  
he a ge eech, he dee e, de, a d e f e he a e. We  
ea ched f gh ha e e e ha 6 dB be he ea a de  
f he e e. T de e he d h f he e dee gh, e a ed a  
he b f he gh a d ed a he a e bef e e  
e c e ed he e a e ha a e ha 3 dB ab e he f  
he gh. The e a h ch h a e a e a de ed a he  
e b da f he gh. The e b da f he h gh a  
b a ed b e a g cce e a e f g he b f he  
gh e e c eed a a e ha a e ha 3 dB ab e he  
f he gh. The e a h ch h a e a a e de ed he  
e b da f he gh. The d e e ce be ee he e a d e  
b da e a e a he d h f a gh. I he ca e ha  
gh e a ed, he e b da f he gh beca e he  
e b da f he ec d gh a d d b e c g f e  
e a dee gh. Fg. 8 h he a de e e f a eg e  
f he Ch e e eech a e, a d de e he a a d d h f  
gh. The a a f e a dee gh a 19% f he  
Ch e e a e b 10% f he E g h a e.

a he ha e e ge c a g d a ed e f a ce, a d  
he a f a g a h gh de e de he -  
a f he a ge a d a e ce. The e gge  
ha e e he ce f he a ge a e ca ha e a c g  
e ec ec g g he a ge eech e e ce he e -  
e ce f eech a e. S ec ca, he e e d h  
ha e e g a d e e - e e ce e g he a ge -  
a e' ce ca g ca e ec g f he  
a e d he f e g h e e ce he he a -  
e - a e eech. The ef e, add e ce ed  
a a e a a (F e a e a, 1999, 2001; L e a, 2004; W e a, 2005), a edge ab a ge  
ca (K d d e a, 2005b), a d he f a a c e  
f he e (F e a e a, 2004; he e e d),  
edge f he a ge - a e' ce ca a e e',  
eech c ca he e e ce f a g eech  
he he g age a Ch e e. I d be e e g  
ee he he he e a e a e ec f ce f E g -  
h e e.

I a e ha he e ec f a d e e - e -  
e ce a e - e e ce e d d de e d he de  
h ch c d e e e e e ced. We d ha e  
e, ec ed ch de e ec f he e e e d e ec -  
a b fa a g he e e h he a ge - a e',  
ca cha ac e c. F f ha e e he ca e, e d  
e, ec g d ce a a ge e a e f a g  
he he - g c d eceded he g  
c d ha he he - g c d f ed  
he g c d. I he f e ca e, he -  
e e d ha e e e e e e c g he  
- g c d a d he ef e gh be e, ec ed  
h a a ge e a e f a g ha he a e ca e  
he e he a f e e he a ge - a e' ce  
d be e e e bef e he - g c d a  
e, e e ced. H e e, beca e he e e e de e ec,<sup>2</sup>  
a e ha he a d a f e e  
he a e' ce e ced he a f e a e f  
a g.

## 5. Summary and conclusions

P e e g a d e e Ch e e e e ce e b he  
a ge a e bef e he a ge eech a e e ed fac -  
a ed e e' ec g f each f he a e a b e  
he he a e a eech b he he a e a  
e. M e e, e e g Ch e e a ge eech h  
he a e d bef e e e g he f a ge e e ce  
a fac a ed e e' ec g f he a a b e  
b e a d he h e d, b h fac a e ec a  
a e he he a e a e. Th, a  
edge f he a e' ce a d/ he c e f he a ge

eech e eech ec g a Ch e e "c c -  
a a " e e.

## Acknowledgments

We a e g a ef H a Sh a d Y a -Sha Ch e g f  
gh f c e a d d c, X a L f ech-  
ca, a d We -J e Wa g a d Me g-Y a  
Wa g f da a c ec. Th a ed b  
he Na a Na a Sc e ce F da f Ch a  
(30670704; 60605016; 60535030; 60435010), he Na a  
H gh Tech g Re ea ch a d De e e P g a  
f Ch a (2006AA01Z196; 2006AA010103), he T a -  
Ce T a g P g a F da f he Ta e  
b he S a e Ed ca C, "985" g a f  
Pe g U e, a d he Na a Sc e ce a d E g e e -  
g Re ea ch C c f Ca ada.

## Appendix A

I g he ch e c f c e de e ed he  
a e f  $\mu$  a d  $\sigma$  ha ed he Pea  $\chi^2$  e a e f  
g d e f, he e

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{\left( N_{x,i} - \frac{N}{1 - e^{\sigma x_i \mu}} \right)^2}{\left( \frac{N}{1 - e^{\sigma x_i \mu}} \right)} = \sum_{i=1}^n \frac{\left( \frac{N}{1 - e^{\sigma x_i \mu}} - N_{x,i} \right)^2}{\left( N - \frac{N}{1 - e^{\sigma x_i \mu}} \right)},$$

N he be f e a e e ce a e e ed a a  
SNR  $x_i$ , a d  $N_{x,i}$  he be f c ec de ca  
a ha SNR. The h he ha he da a e de-  
c bed b a g c f c. The be f deg ee f  
feed a ca ed h h  $\chi^2$  a c e a he  
be f SNR he be f a a e e e -  
a ed. Whe e a e g a ch e c f c  
he g da a f a g c d,  $N = 18 * 18 = 324$ ,  
a d  $n = 4$ . He ce he deg ee f feed a e 4 2 = 2.

T de e e he he c ec de ca f he h e  
d c d be ed c ed f he bab e h h ch  
he d d a d e e c ec de ed, e ca -  
ed  $y_{0,0,i}$ ,  $y_{0,1,i}$ ,  $y_{1,0,i}$  a d  $y_{1,1,i}$  f each f he f SNR  
( $i = 1, 4$ ), he e he b c ec e he he he  
a b e a c ec de ed (1) (0), a d  
he ec d b c ec e he he he ec d a b e  
a c ec de ed. Beca e he e a e f  
a e, c e ca eg e e ca ca e

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{y_{0,0,i} N * 1 p1_i * 1 p2_i^2}{N * 1 p1_i * 1 p2_i} + \sum_{i=1}^n \frac{y_{1,0,i} N * p1_i * 1 p2_i^2}{N * p1_i * 1 p2_i} + \sum_{i=1}^n \frac{y_{0,1,i} N * 1 p1_i * p2_i^2}{N * 1 p1_i * p2_i} + \sum_{i=1}^n \frac{y_{1,1,i} N * p1_i * p2_i^2}{N * p1_i * p2_i}$$

<sup>2</sup> Se a a e ANOVA e e c d c ed he a e age e ce c ec  
ache ed each f he a g x e c d ch e c f a  
de e ec f b h a b e e a d. I e f he c d d d  
he de f e g each a ca g ca ce.

he e  $p_{1i}$  a d  $p_{2i}$  a e he bab  $\lambda$  e f ge g  $\lambda$  abe  
e a d c ec, e ec e $\lambda$ , he he e e ce a e  
e e ed a SNR  $i$ . Va  $\lambda$  e f  $p_{1i}$  a d  $p_{2i}$  e e de e ed  
ha ed h  $\chi^2$ . The be f deg ee f f eed  
a each e e  $i$  1 beca e he e a e f  $\lambda$  -e, c $\lambda$  e  
ca eg e (3 deg ee f f eed ), a d e a a e-  
e a each e e  $\lambda$  f SNR  $\lambda$  a g 1 deg ee f f eed f  
each SNR e e  $\lambda$  a d 4 deg ee f f eed  $\lambda$

## References

- A b ga , T.L., Ma , C.R., K dd, G., 2002. The e ec f a a $\lambda$   
e a a f a a a d e e ge c a g f eech. J.  
Ac . S c. A e . 112, 2086 2098.
- A a , P.F., S e ed, Q., 1989. M de  $\lambda$  g he e ce f  
c c e e $\lambda$  e $\lambda$  h he a e f da e a f e e c . J.  
Ac . S c. A e . 85, 327 338.
- B ga , D.S., 2001. I f a a a d e e ge c a g e ec he  
e ce f  $\lambda$  a e a $\lambda$  e . J. Ac . S c. A e . 109,  
1101 1109.
- B ga , D.S., S , B.D., E c , M.A., Sc , K.R., 2001.  
I f a a a d e e ge c a g e ec he e ce f  
 $\lambda$  e  $\lambda$  a e a $\lambda$  e . J. Ac . S c. A e . 110, 2527 2538.
- B ga , D.S., S , B.D., 2002. The e ec f a a $\lambda$  e a a  
d a ce he f a a a d e e ge c a g f a ea b  
eech g a $\lambda$  J. Ac . S c. A e . 112, 664 676.
- Da , C.J., H , R.W., 2000. E ec e e f a a $\lambda$  c e , d ,  
a d a $\lambda$  e cha ace c e ec e a e . J. Ac . S c. A e .  
107, 970 977.
- Da , C.J., B ga , D.S., S , B.D., 2003. E ec f f da e a $\lambda$   
f e e c a d ca $\lambda$  ac  $\lambda$  e gh cha ge a e e f  
 $\lambda$  a e a $\lambda$  e . J. Ac . S c. A e . 114, 2913 2922.
- D ach, N.I., Ma , C.R., Sh -C gha , B.G., A b ga , T.L.,  
C b , H.S., K dd, G., 2003. I f a a $\lambda$  a g; C e ac g  
he e ec f  $\lambda$  ce a b dec ea g a ge - a e  
 $\lambda$  . J. Ac . S c. A e . 114, 368 379.
- Fe e , J.M., P $\lambda$  , R., 1990. E ec f c a g e a d e fe g  
eech he eech ece h e h d f a ed a d a $\lambda$   
hea g. J. Ac . S c. A e . 88, 1725 1736.
- Fe a , R.L., Ba $\lambda$  h a , U., He fe , K.S., 2001. S a a $\lambda$  e a e f  
f a a $\lambda$  a g eech ec g . J. Ac . S c. A e .  
109, 2112 2122.
- Fe a , R.L., Ba $\lambda$  h a , U., He fe , K.S., 2004. E ec f be f  
a g a $\lambda$  e a d a d g f a a $\lambda$  a g  
eech ec g . J. Ac . S c. A e . 115, 2246 2256.
- Fe a , R.L., He fe , K.S., McCa $\lambda$  D.D., C $\lambda$  f , R.K., 1999. The e  
f e ce ed a a $\lambda$  e a a he a g f eech. J. Ac .  
S c. A e . 106, 3578 3588.
- G af , H.A., A $\lambda$  ge , S.D., 1994. Ma g f eech b a $\lambda$  de-  
d a ed e. J. Ac . S c. A e . 95, 518 529.
- He fe , K.S., 1997. A d a d a d a $\lambda$  e ce f c a a d  
c e a a $\lambda$  eech. J. S . La . Hea . Re 40, 432 443.
- H a d-J e , P.A., R e , S., 1993. The e ce f eech  
c a g e. Ac ca 78, 258 272.
- Ka $\lambda$  g, J., 1998. C a f eech e $\lambda$  g b $\lambda$  be ee E g $\lambda$  h a d  
Ch e e. J. Ac . S c. A e . 103, 1213 1216.
- K dd J ., G., Ma , C.R., Ga $\lambda$  , F.J., 2005a. C b g e e ge c a d  
f a a $\lambda$  a g f eech de ca . J. Ac . S c. A e .  
118, 982 992.
- K dd J ., G., A b ga , T.L., Ma , C.R., Ga $\lambda$  , F.J., 2005b. The  
ad a age f g he e  $\lambda$  e . J. Ac . S c. A e . 118,  
3804 3815.
- K dd J ., G., Ma , C.R., R h a , T.L., De $\lambda$  a $\lambda$  P.S., 1998. Re a e  
f a g d e a a $\lambda$  e a a f ce he de ca  
f eech a d a e . J. Ac . S c. A e . 104, 422 431.
- K dd J ., G., Ma , C.R., De $\lambda$  a $\lambda$  P.S., W d , W.S., C b , H.S.,  
1994. Red c g f a a $\lambda$  a g b d eg ega . J.  
Ac . S c. A e . 95, 3475 3480.
- K h a , A., X , Y.S., Ga d , J., Ca a , P., 2005. E c d g f ch  
he h a b a e e e a g age e e ce. C g. B a  
Re . 25, 161 168.
- L , L., Da e a , M., Q , J.G., Sch e de , B.A., 2004. D e he  
f a c e fa e a ce d e e a $\lambda$  a ec eech  
ec g ge a d de ad  $\lambda$  ? J. E . P ch.: H . Pe .  
Pe f. 30, 1077 1091.