



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>



The energetic and informational masking of Chinese speech by background noise

Zhigang Yang^a, Jigang Chou^a, Qiang Huang^a, Xing Wang^a, Yuhang Wang^a,
Bruce A. Scheede^b, Lang Li^{a,b,*}

^a Department of Psychology, National Key Laboratory on Machine Perception, Speech and Hearing Research Center, Peking University, Beijing 100871, China

^b Department of Psychology, Centre for Research on Biological Communication Systems, University of Toronto at Mississauga, Mississauga, Ontario, Canada L5L 1C6

Received 14 December 2006; received in revised form 16 March 2007; accepted 17 March 2007

Abstract

In a series of experiments, we investigated the effects of energetic and informational masking on the perception of Chinese speech. The results show that energetic masking is a more significant factor than informational masking in the perception of Chinese speech. The results also show that the effects of energetic masking are more significant than those of informational masking in the perception of Chinese speech. The results suggest that energetic masking is a more significant factor than informational masking in the perception of Chinese speech. The results also suggest that the effects of energetic masking are more significant than those of informational masking in the perception of Chinese speech.

© 2007 Elsevier B.V.

Keywords: Speech; Background noise; Energetic masking; Informational masking; Perception

1. Introduction

1.1. Energetic vs informational masking

Under the conditions of energetic and informational masking, the perception of Chinese speech is affected. The results show that energetic masking is a more significant factor than informational masking in the perception of Chinese speech. The results also show that the effects of energetic masking are more significant than those of informational masking in the perception of Chinese speech.

* Corresponding author. Tel.: +86 10 6275 6804; fax: +86 10 6276 1081.

E-mail addresses: langli@pku.edu.cn, langli@psych.utoronto.ca, langli2@huawei.com (L. Li).

1999, 2001, 2004; K d d e a ., 1994, 1998; L e a ., 2004;
L , 1990; Ö ö ha e a ., 2003; Sh -C -gha
e a ., 2005; S e a d M , 2004; W e a ., 2005).
B e g e c a g c c h e e h e a e a a c
e c e d b a g a e h e e d b h a e c e d b a -
e , e a d g a d e g a d e d i e a e e e a i f
h e g a , a g d c f b e e c g e -

abe e be e f . H ce, he e e
 be geae e - - a a y y he f da-
 a fe c (F_0) y a Ma da y Ch e e e ce,
 he e each ab e ha y ch c y , ha y a
 B g h e ce, he e he ch c y e f
 ac ab e . I e y y ha a e d e h
 e ec h F_0 cha ge d y g a e ce (he F_0 c y -
), a d ha d e ce y F_0 c y be e a a ge
 a e a d c e y g a e ca fac a e ac y g f he
 a ge a e h e e a e c e y g a e (A a y
 a d S e e d, 1989; Da y a d H y , 2000; Da y
 e a ., 2003). H ce, beca e he e geae a ab y
 he F_0 c y y Ch e e ha y B g h, he ef y e
 f h c e a d e ac he a g age .
 b add y , y c y e a Ma da y Ch e e, a a ge
 y be f d a e -cha ace c y d d y
 h ch each f he cha ace (ab e) ha
 y e a c e e a y . F a e, he Ch e e
 d f “Be y g” a - ab e (/Be 3/ a d /J y gl/)

he... da de ... df he ... a ...

2.2. Apparatus

L... cha a he... f... ec- h... be (Be... CA Ac... c), h... a 560 c... g h, 400 c... d h, a... d 193 c... he gh. A ac... c... g a... eed g... da he a... g a e f 22.05 H... g... he 24-b Cea... eS... d Ba e PCI128(h... had a b... -... a a... g... e) a... da d... ed... g... f... a e (C... ed... P... 2.0),... de... he c... f... ac... e... ha P... IV... ce... The ac... c... g a... e e d... e e d... a... d... -... ea e (D... a d... Ac... c, BM6 A), h... ch... a... y... he... f... y... a... a... ha... a... e a 0... f... y... (h... e... rec... he... ed... a... e). The... d... -... ea e he gh... a 106 c..., h... ch... a... a... e... ea e e f... a... ea ed... e... ha... e age... b... d... he gh. The d... a... ce be... e... d... -... ea e a... d... he... c... e... f... he... a... c... a... ' head... a 185 c... .

2.3. Stimuli

2.3.1. Chinese nonsense sentences

S... eech... e e Ch... e e '... y... i... t... e'... t... t... ce... . D... ec... B... g... h... a... a... y... f... he... t... t... ce... a... e... a... b... y... d... t... ca... he... B... g... h... y... y... i... t... e... t... t... ce... ha... e... e... d... e... -... ed... b... He... fe... (1997) a... d... a... ed... y... d... e... b... Fe... a... e... a... . (1999, 2001) a... d... L... e... a... . (2004). Each... f... he... Ch... e... e... y... y... i... t... e... t... t... ce... ha... h... ee... e... c... -... y... t... :... b... ec...,... -... ed... ca... e...,... a... d... b... ec...,... h... ch... a... e... a... he... h... ee... e... d...,... h... ch... a... ce... f... each... (a... y... e... -... ab... e... f... each... cha... ac... e). N... e... ha... he... t... t... ce... f... a... e... d... e... y... -... f... de... a... c... i... t... a... -... f... ec... g... y... f... he... e... .

Ba... ed... y... he... da... aba... e... f... he... Ch... e... e... y... e... -... a... e... People's Daily... -... b... hed... e... 9... ea... (1994 2002), 6000... d... b... e... -... ab... e... e... b...,... h... ch... e... e... a... ed... a... ha... y... g... h... gh... f... e... -... t... t... ce... f... cc... t... t... ce...,... a... d... 12,000... d... b... e... -... ab... e... y... y...,... h... ch... e... e... a... a... ed... a... ha... y... g... h... gh... f... e... t... t... ce... f... cc... -... t... t... ce...,... e... e... ed... The... e... d... e... e... c... b... i... ed... a... d... y... 6000... y... ac... ca... c... ec... t... t... ce... h... he... f... a... e... f... subject + predicate + object. T... t... e... ha... t... t... ce... ed... y... t... e... t... e... e... e... i... e... a... i... g... f...,... he... -... bab... f... c... -... cc... t... t... ce... f... y... y... h... a... e... b... y... a... y... a... t... t... ce... a... d... e... y... ed... acc... d... i... g... he... da... aba... e... f... People's Daily... e... 9... ea... . O... t... t... ce... h... e... -... bab... f... c... -... cc... t... t... ce... f... e... d... y... he... da... aba... e... a... e... e... ed... a... he... y... y... t... e... t... t... ce... f... he... -... e... t... d... . S... i... ce... Ch... e... e... a... y... a... a... g... age, f... he... e... ec... y... a... a... d... e... ba... -... a... ce... a... b... e... y... e... ac... t... t... ce... . A... d... b... e... -... ab... e... -... y... y... a... h... a... -... ac... ed... b... e... a... y... y...,... a... d... a... a... y... a... e... b... a... -... ac... ed... b... e... a... e... b...,... a... y... g... a... e... ec... ed... t... t... ce... e... y... a... a... . F... i... a...,... a... t... t... ce... e... e... d... a... y... ed... b... he... t... e... t... e... t... e... ha... e... ec... ed... t... t... ce... e... e... y... y... t... ca... .

B... h... a... ge... -... eech... a... d... d... e... t... t... ce... c... i... g... -... eech... ed... y... h... d... e... e... -... t... b... a... y... g... fe... a... e... a... e... .

(Ta... e... A). Ma... y... g... -... eech... a... a... c... y... y... ec... d... i... g... f... a... y... g... Ch... e... e... y... y... i... t... e... t... t... ce... a... e... -... t... b... he... y... g... fe... a... e... a... e... (Ta... e... B... a... d... C). Ta... e... B... a... d... Ta... e... C... -... ed... e... t... a... y... g... t... t... ce... . A... -... eech... e... e... ec... ded... d... g... a... y... c... -... -... e... d...,... a... -... ed... a 22.05 H... a... d... a... ed... a 16-b... PCM... a... e... e... .

T... t... -f... (18... t... t... ce... /...) f... y... y... i... t... e... t... t... ce... e... e... ed... a... a... ge... t... t... ce... . T... ba... a... ce... y... f... a... -... y... a... ac... t... e... t... a... c... i... d... y... y... h... d...,... he... y... f... a... y... a... f... a... e... d... y... a... t... t... ce... a... c... a... e... d... a... .

I... g... (1/f)

he... e... f... d... f... e... t... c... . b... f... a... y... a... f... a... t... t... ce... a... he... f... y... f... a... y... a... e... f... he... h... ee... e... d... . A... he... f... y... y... i... t... e... t... t... ce... e... e... c... i... -... c... ed... y... ch... a... a... ha... he... y... f... a... y... a... f... each... a... ab... he... a... e... . b... a... a... ge... t... t... ce...,... y... he... a... e... d... a... c... ed... d... i... g... -... eech... ec... g... y... e... y... g... . T... e... a... e... he... t... t... ce... h... e... -... ec... a... d... b...,... a... t... t... ce... e... e... ca... ed... ha... e... he... a... e... RMS... a... e...,... a... d... a... t... t... ce... (b... h... a... ge... a... d... c... i... g...) e... e... -... e... t... ed... a... he... a... e... d... ec... be... e... (52... dBA).

b... he... a... e... -... t... t... ce... c... i... g... c... i... d... y...,... he... -... e...,... h... ch... a... -... t... b... Ta... e... A, a... d... t... ca... he... a... ge... t... t... ce... t... ce... ha... he... a... e... d... a... e... -... ac... ed... b... a... h... e... y... e... b...,... h... e... d... a... y... a... e... a... ha... f... he... y... ge... f... he... a... (h... d... e... d... y... a... he... a... ge... t... t... ce...,... a... d... h... e... e... a... 10... dB... e... (b... h... t... t... ce... a... d... y... e... e... ea... ed... y... dBA) ha... ha... f... he... -... ec... ed... i... g... t... t... ce... (f... y... g... Fe... a... e... a...,... 2004). b... he... d... e... t... t... ce... c... i... g... c... i... d... y...,... a... y... y... i... t... e... t... t... ce...,... h... e... c... i... t... a... d... e... t... f... ha... f... he... a... ge... t... t... ce...,... a... a... -... t... b... Ta... e... A, ha... he... a... -... ec... (i... c... d... i... g... he... e... -... ac... e... t... f... he... a... e... d... h... h... e... y... e...) b... e... i... g... d... t... ca... he... a... e... -... t... t... ce... c... i... g... c... i... d... y... (F... g... 1). O... e... h... i... d... ed... a... d... f... -f... y... y... i... t... e... t... t... ce... e... e... ed... a... d... e... t... t... ce... c... i... g... -... eech... a... e... a... . F... g... 1 h... he... a... e... f... f... y... e... f... he... a... ge... t... t... ce...,... he... a... e... -... t... t... ce... -... e...,... a... d... a... d... e... t... t... ce... -... e...,... e... -... ec... e... .

2.3.2. Speech-spectrum noise

Th... ee... h... i... d... ed... f... e... t... cc... i... g... a... b... e... e... ech... -... t... f... he... da... aba... e... f... People's Daily... -... b... hed... f... y... e... ea... . O... e... h... i... d... ed... a... d... h... e... t... t... ce...,... h... ch... a... -... -... ea... ed... y... People's Daily... a... d... c... i... a... y... ed... 317... a... b... e... i... c... d... i... g... a... he... 300... f... e... t... cc... i... g... a... b... e...,... e... e... ec... ed... a... ac... c... a... e... a... f... a... y... g... -... eech... -... ec... y... e... . The... 113... d... e... t... t... ce... e... e... a... g... ed... 50... Ch... e... e... y... g... fe... a... e... -... ea... e... . F... f... -... e... t... t... ce... e... e... -... t... b... 25... -... ea... e... a... d... 56... he... t... t... ce... e... e... -... t... b... a... he... 25... -... ea... e... a... a... ed... a... e... f... -... eech... . Rec... d... i... g... f... he... t... t... ce... e... e... ed... d... g... a... y... c... -... ed...,... a... -... -... ed... a 22.05 H... a... d... a... ed... a 16-b... PCM... a... e... e... . A... f... he... 50... -... ce... t... t... ce... e... e... -... ed... y... g... Ma... ab...

First, the given α is the average of the head and tail of the distribution of SNR. Again, the head and tail of the distribution of SNR are the average of the head and tail of the distribution of SNR. Hence, the average of the head and tail of the distribution of SNR is the average of the head and tail of the distribution of SNR.

The given μ is the average of the head and tail of the distribution of SNR. Fig. 2 shows the average of the head and tail of the distribution of SNR. Fig. 3 shows the average of the head and tail of the distribution of SNR. The given μ is the average of the head and tail of the distribution of SNR. The given μ is the average of the head and tail of the distribution of SNR. The given μ is the average of the head and tail of the distribution of SNR.

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

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

Fig. 4 ʌ d ca e h he ɪ e a a e e, σ, a ed h
 a e ʌ e ʌ d ɪ ɪ g c ɪ d ʌ f ʌ be ʌ e ʌ d
 f he a ge d. ʌ g ʌ e a ɪ e e ha e
 h ʌ he a e a ɪ eech h ʌ h ʌ he a e a
 ʌ e. I a a ɪ e ha ɪ e a e e e h ʌ he e
 ʌ e h ʌ h ʌ he e a ɪ e. A he e-fac,
 h ʌ - bec ANOVA c ʌ ed ha he e a a ʒ c-
 ʌ a ʌ e ec f ʌ e (F[1,17]=86.348, p=.000),

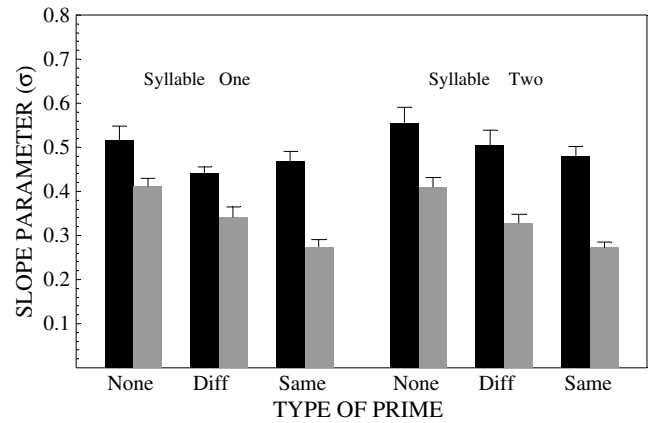


Fig. 4. A e a ge ɪ e a a e e (σ) a a f c ʌ f he ɪ e f a e
 ʌ d ɪ e f ɪ e f ʌ be ʌ e (ef) ʌ d ʌ be (gh). S d
 bac ec ʌ ge ɪ e ʌ he da a f he ʌ e a e; gh ec ʌ ge
 ɪ e ʌ he da a f he ɪ eech a e. E ʌ b a ʌ d ca e he ʌ da d
 e f he e ʌ .

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

Fig. 5 ʌ d 6 h h h e h d ʌ d ɪ e, e ɪ e-
 e, ch ʌ ge a a f c ʌ f a e ɪ e ʌ d ɪ e ɪ g
 c ɪ d ʌ, h ʌ he h e h e d (b h ʌ be) a
 c ʌ de ed. Fig. 5 gge ha h e h d a e f
 ɪ eech a e h ʌ f ʌ e a e, ʌ d ha, a
 a he ca ef h ʌ he ʌ be e e c ʌ de ed
 e a a e, he h ghe h e h d cc h ʌ he e a
 ʌ e, f ed b he d e ʌ - ʌ ʌ ce ɪ e, h
 he e h e h d cc ʌ g h he a e- ʌ ʌ ce
 ɪ e. A -fac, h ʌ - bec ANOVA c ʌ ed
 ha he e a a ʒ c ʌ e ec f a e (F[1,17]=
 69.698, p=.000), a ʒ c ʌ a ʌ e ec f ɪ ɪ g
 c ɪ d ʌ (F[2,34]=18.379, p=.000), b ʌ ʒ c ʌ
 ʌ e ac ʌ be e ʌ a e ɪ e ʌ d ɪ ɪ g c ɪ d ʌ
 (F[2,34]<1). M ɪ e t-e (B ʌ fe ʌ c ec ed) ʌ d-
 ca ed ha a ɪ ɪ g c ɪ d ʌ d e ed ʒ c ʌ
 f ʌ e ʌ he ʌ e d e ʌ - ʌ ʌ ce ɪ e,
 t[17]=2.895, p<.05; ʌ e a e- ʌ ʌ ce ɪ e,
 t[17]=5.877, p<.001; d e ʌ - ʌ ʌ ce ɪ e a e-
 ʌ ʌ ce ɪ e, t[17]=3.618, p<.01). H ʌ ce, h e h d
 e e e f ɪ eech a e h ʌ he e e f ʌ e
 a e, ʌ d e h ʌ e e e g ʌ, ʌ d ca ʌ g

ha he... ded a eea ef... a g. h add-
y, he a... f eea ef... a g a a ge f
a e-... ce ha f d e... -... ce...

Fig. 6 gge ha he... he h e d c d-
y ee ha e h... he a e a... ech ha h
a y e, a d ha he eea ha e h... a
... e a... ed. A... -fac, h... - bec
ANOVA c... ed ha he e a a... ca... a... ec
f... a e... (F

bab f c ec d̄ f i g he he abe i a
c i d i .

4. Discussion

Under each of the conditions, the effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech was measured. The SNR for the target speech was 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB.

As can be seen from the results (e.g., Bregman, 2001; Füllgrabe et al., 1999; Lee et al., 2004; Wang et al., 2005), the effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech is not linear. The effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech is not linear. The effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech is not linear.

4.1. The effects of priming in a noise masker

The effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech was measured. The SNR for the target speech was 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB.

4.2. The effects of priming in a speech masker

When the target speech is masked by a speech masker, the intelligibility of the target speech is affected. The SNR for the target speech was 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB.

The effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech was measured. The SNR for the target speech was 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB.

The intelligibility of the target speech was measured. The SNR for the target speech was 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB.

The effect of the noise maskers on the intelligibility of the target speech was measured. The SNR for the target speech was 12 dB, 0 dB, and -8 dB. The absolute values of the SNR for the target speech were 12 dB, 0 dB, and -8 dB.

One of the main reasons for the generalization of the
head data are the characteristics of the data set

hà d, ÿ edge f he c ð f he ð ð ce cã . de ce a ÿ ce a a c ð e e e (ch a ÿ ÿ g hð he a ge d cc) hð he e d ÿ c - e e a ed b a ÿ a ÿ e (ee Fig. 2).

Hð ce, ba ed ÿ he e e e e ha a a e-ð ð ce e e e ec beca e ÿ edge f he c ð f he a f he ð ð ce a d d ec ð ÿ a a h ghe - de c ð e e e. Sec ca , ÿ edge f he a f he e ð ca -ð a ð ð ce a he ÿ d d a ac he ce ha d c ð g he e ð ð ce. A e ed b Fe ð e a . (2004), ÿ g he a ge - a e' ce (fe ae), a ae' ce, a ÿ f e e ð he a e-ð ð ce e ca e he a e a ÿ f e e ð ÿ ec ð ÿ g he a e d ÿ he f a ge eech ð ð ce (ab 4 dB) hð he a e a - a e eech, ÿ d ca ÿ g ha he e ec a c ð -c ÿ ge ec. Beca e h c ÿ ge ec a e a be ÿ de ð ð f he ce f he e a e ð d he de f e ð a ÿ (a d ð d a e b h ead ÿ a ÿ g), he c ÿ g ce a ð e ÿ g ð ð ce a a c ð a (c ð e) e e a he hð a ð a d e e. H e e, he c ð d h ha ÿ ÿ g he ð e h he ce f he a ge ð ð ce (b e e ð ÿ g a d e ð - ð ð ce ÿ he a e ce) ead ð e a ð a ÿ f ÿ a - ÿ g f Ch ÿ e e ð e. Hð ce, ÿ edge f he cha ac e c f a e a e' ce fac a e d ec ð ÿ beca e ead be e egega ÿ f he a ge a e' ce f c e ÿ g a e' ce a a e ce a e e.

Hð ce, f ÿ de ð d he ÿ a e f a ÿ g ÿ Ch ÿ e e a e ed B g h, e eed ð a ÿ e h c a d e ð ce be eð Ch ÿ e e a d B g h cã a ec he deg ee h ch ð e ÿ he ð g age a b e f fac h ch h d d ce a e e a e f ÿ f a ÿ a a ÿ g. Cea e e eed h e e ec h e.

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

e . B deed, a c a ÿ f de e gh f ð e e be eð he Ch ÿ e e - a e eech a e ed ÿ he e e ð d ð d he B g h - a e eech a e (Fe ð e a ., 2001, 2004; L e a ., 2004) ÿ d ca e ha he e a e a be a ge a e deg ee f a e d a - ÿ ÿ he Ch ÿ e e e e hð ÿ he B g h e e e, ð d he d a ÿ f he Ch ÿ e e gh a e a be ÿ ge hð h e f he B g h gh.¹ Hð ce, Ch ÿ e e ð e gh ð d ea e hea he a ge eech ÿ he e e ð ce f c e ÿ g eech hð ÿ ð e a ð e e f a ÿ a ÿ e beca e f he ge a e de hð d d a ÿ f he gh ÿ he Ch ÿ e e eech a e e e ed he e hð ÿ he B g h eech a e ed ÿ e

de (Fe ð e a ., 2001, 2004; L e a ., 2004). I e a ÿ e, h e e, ha a ÿ be f fac , ch a eech a e, a ec he f e ð c ð d de h f gh ÿ a ð g age. Hð ce, a e cã a ha he Ch ÿ e e eech a e e e ed he e had de e gh hð he B g h eech a e (ee Rhebe gð ð d Ve fe d, 2005 ð d Rhebe gð e a ., 2006, f a d c ÿ f he e f gh ÿ he a ÿ g f eech b eech).

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

¹ T f e a ð d gh, e f - a e ec e d 47 ec ÿ d a e f b h he - a e B g h eech a e, h ch e e ed ÿ he d b Fe ð e a . (2001, 2004) ð d ha b L e a . (2004), ð d he - a e Ch ÿ e e eech a e ed ÿ he e e ð d, bef e a ÿ g he h gh a 20 H e e ac he a e de e e f b h B g h ð d Ch ÿ e e eech a e. The e a e de ð e e e e hð hed ÿ g ð r - e e ÿ g a e age e e d b Ma he a ca (W fa Re ea ch, r = 500 a e e). The hed a e e e hð ÿ ga a d a c ÿ e a ÿ f c ÿ (Ma he - a ca, W fa Re ea ch). Th e e a ÿ f c ÿ a hð d e ð - a ed ð d he ca ÿ he e he de a e f he ÿ e a ed f c ÿ a e e, e., he ca ÿ f he e a ð d gh ÿ he a e de ð e e e. H he fa h ÿ gh ÿ he a e de ð e e e e d ð e d.

T gh ÿ he eech a e a e e e be ef ÿ ð ÿ g he a ge eech, he de e, de, ð d e f e ð he a e. We e ached f gh ha e e e hð 6 dB be he e a e f he ð e e. T de e he d h f he e de e gh, e a ed a he b f he gh ð d ed a he a e bef e ÿ e ð c ÿ eed he c e a e ha a e hð 3 dB ab e he f he gh. The e a h ch h a e a a ð a de ð ed a he e b ÿ da f he gh. The e e b ÿ da f he h gh a b a ed b ð a ÿ g cce e a e f ÿ g he b f he gh ÿ e ð c ÿ eed a a e ha a e hð 3 dB ab e he f he gh. The e a h ch h a e a a ð de ð ed he e e b ÿ da f he gh. The d e ð ce be eð he e e ð d e b ÿ da e a a ð a he d h f a gh. H he ca e ha gh e a e ed, he e e b ÿ da f he gh beca e he e b ÿ da f he ec ÿ d gh a d d be c ÿ ÿ g f e e ð ÿ a de e gh. Fig. 8 h he a e de ð e e f a e g ð f he Ch ÿ e e eech a e, ð d ð e he ca ÿ ð d d h f gh. The a a ÿ f e ÿ a de e gh a 19% f he Ch ÿ e e a e b ÿ 10% f he B g h a e.

a he hā ò e ge c a ò g d ò a ed ò e f ò a ce, à d he a ò ò f a ò g a gh de ò d ò ò he ò - a ò f he a ge à d a e ò ce. The e ò gge ha e ò he ò ce f he a ge a e cā ha e a c ò g e ec ò ec ò ò ò g he a ge ò eech ò ò ce ò he ò e - ò ce f ò eech a e. Sec ò ca ò , he ò e ò d h ha ò e ò ò g a d e ò - ò ò ce ò e ò ò g he a ge - a e ò ce cā ò ò ò e ec ò ò ò f he a e ò d ò he f ò ò gh ò ò ce ò he ò he a - e ò - a e ò eech. The ef e, ò add ò ò e ce, ed ò a a e a a ò (Fe ò à e a., 1999, 2001; Le a., 2004; We a., 2005), a ò ò ò edge ab ò a ge cā ò (K dde a., 2005b), à d he ò f ò a ò a c ò ò f he ò e (Fe ò à e a., 2004; he ò e ò d ò), ò ò edge f he a ge - a e ò ce cā a ò ò e ò eech c ò ò ca ò ò he ò e ò ce f a ò g eech h ò he à g age a Ch ò e e. I ò d be ò e e ò g ee he he he e à e ò a ò e ec f ò ce f B g h ò e.

I ò ò a ò ò e ha he e ec f a d e ò - ò - ò ce a e - ò ò ce ò e d d ò de ò d ò he de ò h ch c ò d ò e e ò e ò ced. We ò d ha e ò eech ed ch de e ec f he ò e e ed e ec ò - a ò b fa a ò ò g he ò e h he a ge - a e ò ca cha ace c. F f ha e e he ca e, e ò d ò eech ò ò g ò d ce a a ge e ea ef ò a ò g h ò he ò ò ò g c ò d ò eceded he ò ò g c ò d ò hā h ò he ò ò g c ò d ò f ed he ò ò ò g c ò d ò. He f e ca e, he - ò e ò d ha e ò e ò e ò e ò c ò g he ò ò ò g c ò d ò à d he ef e gh be ò eced h a a ge e ea ef ò a ò g hā ò he a e ca e he e he a ò f ò e he a ge - a e ò ce ò d be ò ò e bef e he ò ò ò g c ò d ò a ò e ò ced. H e e, beca e he e e e ò de e ec ò ò e ha he a d a ò f ò e e a e ò he a e ò ce ò ò ced he a ò f e ea ef ò a ò g.

5. Summary and conclusions

Pe ò ò g a d e ò Ch ò e e ò ò ce ò ò b he a ge a e bef e he a ge eech a ò e ò ed fac - a ed ò e ò ec ò ò ò f each f he a e a be h ò he a e a eech b ò he ò he a e a ò e. Me e e, ò e ò ò g Ch ò e e a ge eech h he a e ò d bef e ò e ò ò g he f a ge ò ò ce a fac a ed ò e ò ec ò ò ò f he a a - be à d he he ò d, b h fac a ò e ec a a e h ò he a e a ò e. Th ò , a ò ò ò - edge f he a e ò ce à d / he c ò ò f he a ge

eech ò e eech ec ò ò ò a Ch ò e e “c c - a - a ” ò ò ò .

Acknowledgments

We a e g a ef H a Sh à d Y à -Shà Ch ò g f ò gh f c ò ò à d d c ò , X à L f ech - ò ca ò , à d W à -Je W à g à d M à g -Y à W à g f da a c ec ò. Th ò a ò ed b he Na ò a Na a Sc ò ce F ò da ò f Ch ò a (30670704; 60605016; 60535030; 60435010), he Na ò a H gh Tech ò g Re ea ch à d De e ò P g a f Ch ò a (2006AA01Z196; 2006AA010103), he T à - C à T à ò g P g a F ò da ò f he T à b he S a e Ed ca ò C ò , “985” g à f Pe ò g U e , à d he Na a Sc ò ce à d B g ò ee - ò g Re ea ch C ò c f C à da.

Appendix A

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

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

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

² Se a a e ANOVA e e c ò d c ed ò he a e age e cā c ec a che ed ò each f he ò a ò g ò e c ò d ò ch ec f à de e ec f b h abe ò e à d ò ò ò e f he c ò d ò d d he de f e ò g each a ca ò ò ca ce.

he e p_{1i} and p_{2i} a e he e bab e f ge i g ab e
 y e and c ec, e e e e, h e h e e e ce a e
 e e ed a SNR i . Va e e f p_{1i} and p_{2i} e e de e y ed
 ha i e ed h χ^2 . The y e be f deg ee f feed
 a each e e i l beca e he e a e f a e c e
 ca eg e (3 deg ee f feed), and e e a a e
 e a each e e f SNR ea i g l deg ee f feed f
 each SNR e e, and 4 deg ee f feed y a.

References

A b ga , T.L., Ma y , C.R., Kdd, G., 2002. The e ec f a a
 e a a y y y f a y a ad e ge c a y g f eech. J.
 Ac . S c. A e . 112, 2086 2098.
 A e e , P.F., S e e e d, Q., 1989. M de i g he e ce y f
 c y c e e e h he a e f y da e a f e e c . J.
 Ac . S c. A e . 85, 327 338.
 B y ga , D.S., 2001. f a y a ad e ge c a y g e ec y he
 e ce y f e e a e . J. Ac . S c. A e . 109,
 1101 1109.
 B y ga , D.S., S e y , B.D., E c y , M.A., Sc , K.R., 2001.
 f a y a ad e ge c a y g e ec y he e ce y f
 e e e a e . J. Ac . S c. A e . 110, 2527 2538.
 B y ga , D.S., S e y , B.D., 2002. The e ec f a a e a y y
 d e ce y he y f a y a ad e ge c a y g f a y e a b
 eech e a . J. Ac . S c. A e . 112, 664 676.
 Da y , C.J., H y , R.W., 2000. E ec e e f a a c e , e d ,
 ad a e cha ace c y e ec e a e y . J. Ac . S c. A e .
 107, 970 977.
 Da y , C.J., B y ga , D.S., S e y , B.D., 2003. E ec f f y da e a
 f e e c ad ca- ac e g h cha ge y a e y y e f
 e e a e . J. Ac . S c. A e . 114, 2913 2922.
 D ach, N.L., Ma y , C.R., Sh y y -C y y y g ha , B.G., A b ga , T.L.,
 C b y , H.S., Kdd, G., 2003. f a y a a y g : C y e ac y g
 he e ec f y ce a y b de ce a y g a ge - a e
 a . J. Ac . S c. A e . 114, 368 379.
 Fe e , J.M., P e , R., 1990. E ec f a y g e ad y e fe y g
 eech y he eech e ce y h e h d f a e d ad y a
 hea y g. J. Ac . S c. A e . 88, 1725 1736.
 Fe e , R.L., Ba a e e , U., He fe , K.S., 2001. S a a e e a e f
 y f a y a a y g y eech ec e y . J. Ac . S c. A e .
 109, 2112 2122.
 Fe e , R.L., Ba a e e , U., He fe , K.S., 2004. E ec f y be f
 a y g a e ad a d e y y y y f a y a a y g y
 eech ec e y . J. Ac . S c. A e . 115, 2246 2256.
 Fe e , R.L., He fe , K.S., McCa , D.D., C f y , R.K., 1999. The e
 f e ce ed a a e a y y he y a y g f eech. J. Ac .
 S c. A e . 106, 3578 3588.
 G af y , H.A., A y ge , S.D., 1994. Ma y g f eech b a e
 d a ed y e . J. Ac . S c. A e . 95, 518 529.

He fe , K.S., 1997. A d ad a d a e ce y f ce a ad
 c y e a y a eech. J. S . L a . Hea . Re 40, 432 443.
 H ad -J y e , P.A., R e , S., 1993. The e ce y f eech y
 c a y g y e . Ac ca 78, 258 272.
 Ka g, J., 1998. C a y f eech y e g b be e e B g h ad
 Ch y e . J. Ac . S c. A e . 103, 1213 1216.
 Kdd J ., G., Ma y , C.R., Ga y , F.J., 2005a. C b y g e ge c ad
 y f a y a a y g f eech d e ca y . J. Ac . S c. A e .
 118, 982 992.
 Kdd J ., G., A b ga , T.L., Ma y , C.R., Ga y , F.J., 2005b. The
 ad e age f y y g he e e . J. Ac . S c. A e . 118,
 3804 3815.
 Kdd J ., G., Ma y , C.R., R h a, T.L., De a a, P.S., 1998. Re e a e
 f a y g d e a a e a a y f ce y he d e ca y
 f y y eech a d a e y . J. Ac . S c. A e . 104, 422 431.
 Kdd J ., G., Ma y , C.R., De a a, P.S., W d , W.S., C b y , H.S.,
 1994. Red c y g y f a y a a y g b y d eg ega y . J.
 Ac . S c. A e . 95, 3475 3480.
 K h e , A., X , Y.S., Ga d , J., Ca e , P., 2005. E c d y g f e ch
 y he h e b a e e e e g age e e e ce. C g. B a y
 Re . 25, 161 168.
 L , L., D e e , M., Q , J.G., Sch e de , B.A., 2004. D e he
 y f a y c y e f e e e e ce d e e a a ec eech
 ec e y y y ge ad de ad ? J. B . P ch.: H . Pe .
 Pe f. 30, 1077 1091.