C J – } …. – } Aê ·

# 声学回声消除与波束成形语音增强方法研究

# Study on Acoustic Echo Cancellation and Beamforming Speech Enhancement

Œ 65 = Ö Š A Ø

0; N¶ Ö +e € >FJ 0;

– ' Ö 31609041

7 , ‰ 8 Ö Lx ¶ ‰ ¸

¼ @ O Ö 2018 ¤ 4 8

大连理工大学

Dalian University of Technology

# WF *6 W – – }Aê ·) K W >

作者郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师的指导下进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用内容和致谢的地方外，本论文不包含其他个人或集体已经发表的研究成果，也不包含其他已申请学位或其他用途使用过的成果。与我一同工作的同志对本研究所做的贡献均已在论文中做了明确的说明并表示了谢意。

若有不实之处，本人愿意承担相关法律责任。

学位论文题目：声学回声消除与波束成形语音增强方法研究

作 者 签 名：________________________ 日期：_______年____月____日

# 摘 要

B N# _ ê2« 08 'f,´ Ô Â é ? ÄF ¤ • È ª7-N#1á Ç ` 2 jAÔ È … EõFO È é ï ¶ ê ,´+O#k Ä v _ È ƒ ê D /ë ª7-Aî 7E³F & È TÖ {NþLe GG÷LőB N# ',´ š " E³ ~ È 9 =4ÿE÷B N# Î j 4*6 6<-$ ÕF >|Aö [ È ¦B N# Aö [ x Ì J ¸ Ä!" F È ƒ ª 7-Aî 7 \DÛ Ý n N# &F >| B N#£K^Aý TGÂÈ¦Lî ÖE³ W È6<9 Ä+X – #¸L" ° _ È F J > n Q T GÂ)· Ä … FƒB N# Î j é# <-'f7- O 9 x ` Á f 6ü Ÿ š È v J ) O K 'FP @ +¨ È6< TÖ {NþLe G# • @ ' ° _ l 9 x ` Î jB N# ' DB N# a-O ÖE³ ? Ä

\ · Y+X TÖ {NþLe G ' `AÑ j PFB - " ÈF >|B N# 6/ë È 'f >F 0!• +X5$4ã % # F >|L} š 4*6 Ä!" F È.D0¦ ¶ – #¸L" ° _ Ä \ ·,´ k?± Œ ² ; Ö

(1) û4ý ¶ TÖ {NþLe GB N# Î j1Ç# ,´ - µ F.D0¦)à(æ ¼ – #¸L",´6ü Ÿ È 1° F ¶ /ý $À Ê } ¼B N#Gý W ð#{1Ç# Ä

(2) * ¾ WebRTC 0$À .1 ] ,´ AEC Q ‡ È Î)à ¶ – #¸L" Ä(© [ _ È X1Ç # Î)à E÷0; ] ÈG÷+X 6 ‡NÁ 8 F2Ä% # 1Ç# È ¦ X , 0 F 0 ? w é1Ç# ] Ð •Lb ß Ö (6&è 4*6 È Añ ¶ 1Ç# ,´ Î & W ¼ #¸L" W7- Ä!" F È Ä+X MŽ4ï W 4*6° _ È ëL"!» ‰ È-1 ë ¶ ü1 ð#{ 4*6 Ä ÎP¼5 Ì>˜ > È \ · ,´ – #¸L" 1Ç# x Ì 8Ÿ - Ä

(3) Y+X 0 ? w é ö l È64ï W4Ö • 0 ? é # • @ ' > >5ž5$4ã% # 1Ç# 5 8 È Î)à ¶B N# 6/ë ¼L} š 4*6 Ä § ƒ Š# _ È Y+X4ï W4Ö • 0 ? é 1Ç# ëL" ¢ È Ç ` O K ' È ½FJE÷ >5ž5$4ã% # ˜ ëL"!»+‰ š È FJE÷G}5ž šGý,´ é ? È X ÿ ? a-O ¼ Á f 6ü Ÿ š ] Ç 8F2,´ £>' Ä ÎP¼5 Ì>˜ > È \ · é# XF j õ å ;7-9ç Ç8Ÿ -,´ B N# Î j x Ì Ä

**关键词**：麦克风阵列；自适应波束成形；声学回声消除；远场语音增强

# Study on Acoustic Echo Cancellation and Beamforming Speech Enhancement


## Abstract

Speech is the most natural interactive mode. It also makes smart speakers popular with people. It makes people's lives more convenient. The signal to noise ratio is relatively low when people are far away from the smart device. The speech recognition effect will be poor without speech enhancement. However it is difficult to design a narrow beam main-lobe due to the number of elements and the size of the array. Besides, it is difficult to wake up the keyword when the device sounds without acoustic echo cancellation. The microphone array Beamforming technology can effectively enhance the speech signal and the speech distortion is small.

In this thesis, the microphone array signal is used to estimate the acoustic transfer function ratio for speech separation, and then Winer filtering is used for noise reduction. In addition, acoustic echo cancellation is studied. The contribution of this thesis is summarized as follows

(1) This thesis first introduces related background and the domestic and foreign research status about speech enhancement

(2) This thesis studies an improved adaptive filtering based on the AEC module in WebRTC open source code. The PBFDAF algorithm eliminates the echo in real time. We research anti-gradient blasting, the NLP and the NLMS algorithm. The purpose is to remove the residual echo, so that the double-talk detection can be omitted in the algorithm. Experiments show that the acoustic echo cancellation algorithm can achieve good results.

(3) We combine the LCMV beamforming and the multi-channel post-wiener filtering algorithm so as to speech separation and noise reduction with the minimum mean square error criterion. The LCMV algorithm is used to remove the interference signal to obtain the desired signal. The Wiener-post filter is used to remove the residual noise. The calculated post filter coefficient causes the distortion of the desired signal. A balance is achieved between small distortion and the less introduction of background noise. Experiments show that the method studied in this paper can achieve good results in far-field speech enhancement and improve speech recognition rate


**Key Words**: Microphone Array; Adaptive Beamforming; AEC; Far-filed Speech Enhancement

# 目 录

# 1 绪论

## 1.1 选题的背景及意义

B N# Ô Â _ ê ª7- 08 'f,´ Ô Â é ? È • a _ Y+XB N#AÙ j ˜ \ ò ê *,´ 7 È Š * -( Ä,´ ý Œ È p ª7- × ° _ 0F ¸&› È ê < K Š ` × 7(™ Ä j ¶ $ Ð ï § ¼ $ Ð ê W F È P5 ,´F jAö [ ¼ 9K^ ý Œ!“F@!•>ÛF jB N#Aö [ p / È'f6< X F j õ å ; È" ² ê/ëTÖ {Nþ,´D /ëEî ` 5 2£+J8# $F ,´ & I ÈTÖ {NþG÷Lö `,´B N# '7-Gÿ 6 W W> ÿ È!” F ¢ ¼ š •,´" Gý a-( ) Î Ð È = Š-( £ 4*6-$ Õ+X •Aö [ x Ì a JMŽ h Ä F È ƒTÖ {Nþ 3Aî ¾ ª7-N#1á : & ÈAî 7 \DÛ 9!“ X Ý nN# €,´ & I ÈF aM0?± Y+X – #¸L” ° _ •#¸L” ¦ ],´ È !”.D0¦F jB N# Î j a n Ç q 6 9 õ?± Ä

X : F4Ú › q ¤ Èê a 6TÖ {NþLe G ° _ Ä+X `B N# 4*6 .D0¦ ] Ä ` ¶ 2000 ¤ J+| 0 û ' '$! • ` ) TÖ {NþLe G-( £ ° _F >| CNÈ.D0¦ Äª7- æ uF Z ² % "4ÿ * 9 q J ¤ ¶ È+a ¾ ° _,´L€ f ¼ 2 jM0"r,´ Ï È 0-$ Ž ¾ ? G 1 J È-$ `(™6„5• & ,´ ` • È 2 j,´ j%ð ¼ × ñM0"r ± W ` Ø Ø ¶-( £ ° _,´F … ÄLe GB N# ' Î j k ?± 5 [ TG 6 Ö# • @ ' ¼ •# `Eî `AÑ Ä# • @ ' ° _ _ ¤ Z3+5 ,´ h óG 6 ÈFJE÷ # • @ ' ) 4D Le G ',´ Ð sF >|0ª % # 4*6 È þ6< Î j- 7 é A ' È z a ¦ ³ é A,´ ¢ ¼ š [1] × ² Ì i @8 F2 Ä# • @ 'F 7- O i ž $À }5ž,´ i F >|8 ØD DZ ÈF g 0 • a7- O8 F2 ÄB38² 4 Z Ð s € • Î)à8 F2 Ä Î j Ä 2014 ¤ ÊPœF:ª7-N# 1á × ñ Echo!“ ? 3 È3WL¿ ¦ >,´Bg!| <2« × ñ HomeÃ Ü L ,´ ÊN#1á Ã Rokid œ ( ,´ × ñ 9 *Z ÃLoGü œ (,´ Y)[2î&¥ ú ?2£,´ AI N#1á •-(5 3 È ¦ DK0Gÿ E³ - ÄF ¯ ÇN¶ x WB N# ° _EõFOF • `"A+X4× × ñ,´ Ä+X93+¤ ] Ä

# • @ ' (Beamforming BF) 0 +X ¾FJ ÃM'Eî Ã € Ã `M7 Ò ú k –N¶ È ¦ Ç ` ¶ ¯# Ä+X ¼E³ ,´ … [1] Ä ƒ'fF • _+a • " u,´.D0¦B.NÈ È ¦(©&é _F2+X ¾ í V ' È Î j- 7B$B ê ' È Á f š ¼ ¢ ï ¾ >1 ,´B N#Aö [ Ä ¼ P 5 ,´TÖ { Nþ-(" ÈTÖ {NþLe GG÷Lö `,´ ' § 7 ¶0ª Ÿ È=½ 80ª Ã & ÃNÁ Ÿ § 9 $ Ð&¥#k,´# • × f7- Ë ÈQ ' Î,ú È ± j,´ ¢ Á f7- Ë È0ªL$ 6EØ)· Eî ` 0 Z ¸Q ,´"d ö [1] Ä5, 8 ¶F Ë H&é È ê 6TÖ {NþLe G# • @ '+X ¾ ª7-B N#FJ 3+5 ] }1 ' 4*6G 6 È jF 6 W W i ´B N#CXGÿ È þ6< Q B N#Aö [ ö.ž)· Ä

.D0¦F j õ å ;,´B N# Î j È Y+X ? j (TÖ {NþLe G,´# • @ ' ° _ Î)à È Y +XLe G ' 5 [,´0ªL$ Ÿ Ã & ÃNÁ ŸF >| = < Fƒ,´. Gÿ Ð s È )- 7B N#F

>| Î j È ) ¢ ¼ š F >| 9 x,´ Á f ÈF a _# • @ ’ ° _ Ä# • @ ’1Ç# 9 Í ž )
B‘ = < 6 j * ¾ é A `AÑ,´8 F2 Ä1Ç# Ã* ¾AÝ4ó ' F ò63 ',´# • @ ’1Ç#
ú * ¾ '5 ´,´# • @ ’1Ç# Ä * Ê# • @ ’ 9 0/ý Š# _1° …,´ &F "r ¼ ½-(
Ð È v _ Î j7- Ë 9L€ È 8 F2 Ä# • @ ’ _ i ž = <,´ ö IAîAÑ,´1Ç# È 7- O Î &B3 ¤
sGý3+ • Añ f ‹ ` 0 H@ È \ · k?± Y+X8 F2 Ä# • @ ’1Ç# Î)àF j ‘ & ;B N#
Î j Ä

## 1.2 麦克风阵列技术

TÖ {NþLe G – _ ² % j P ˜Le G È a _ Y+X T Z F : N# P O ˜4ô @,´
–0ª G÷ g3+5 Ä h?ñ,´ 94ï ’ Ã)ß ’ ¼*3 ’Le G È ª7-N#1á žF}G÷+X)ß ’Le G Ä" ²
2014 ¤ ÊPœF: 3,´ EchoN#1áG÷+0X+1)ß ’TÖ {NþLe G5 ´ È Ü L 3,´ ÊN#1á •
_)ß ’ 6 TÖ {Nþ5 ´ È!” FF 9 Y)[2î&¥ Ã ?2£,´ ?(aN#1áG-G÷+XTÖ {NþLe G5 ´ Ä
TÖ {NþLe GL” ¶ Ä+X X ª7-N#1á : ÈF +X ¾ ª7-+e?ö Ã j ˜ ê ú"-E– : È j
X :F j Ÿ ]F j õ å ; …TÖ {Nþ,´ pL€ a J n)à * • Ä#¸Ci4×TÖ {NþLe G 08\+X ¾ æ
Ý ] È ƒ < & ˆ X J ZB$B ê ÃD /ë" E³F D)ß ³ 8 r & È A Y+X8 F2 Ä# • @
’1Ç# Î j- 7B$B êB N# ' È Á f ¢ ¼ š Ä4ÿE÷ }1 ' 4*6 È ª7-N#1á F ¦
³ ª7- æ u a 7- OE« CAö [ *- 7B N#,´ µ é È þ6< Š * ) Ä,´ ý Œ È" ²5• :C](™ F
65 Y"D B ÄF /ý ª7- é ? ± W ` é ï ¶ ê ,´ h+O#k È • @ j ƒ } ª7-N#1á' †,´
0 W Þ&é Ä
ƒ N# P O ˜D /ë $À" E³F & AÔ j # _*3M’# ÈF ZD /ë+X4ÿP¼ œ ?
T Ý È4ïLe _ Le G kL$D £ é ¼ z# K¯,´" l Œ j ò63 Ä XF j Q » ; È 4FJFƒ Õ f
',´ u Ö 2 = -+• ÈF & $À#{ A < &M0?± Y+X u Ö 2 ¼-( } 2 Ÿ Ä ƒ P
O ˜ ¼ $ÀD /ë W ¾ ò63 l & È AÔ j # j £M’# È X#¸Ci4×TÖ {NþLe G ÎLu Ä+X
j Ÿ ] WG- Œ jF j Q » È" ² X $À#{ A ]+X ` TDOA 1Ç# & a+X `F j Q » Ä+a ¾
F j Q » º ÎLu õ å Š ¶1° F È L} ~ ¶ 4*6 = r Ö ÈF • _ 08\,´B N# Î j1Ç# G÷+XB
Q »,´ k?± Ï Ä

## 1.3 发展历程及研究现状

### 1.3.1 波束成形

8 F2 ÄLe G ' 4*6F 0*6Aê 0 F-$ß ` 20 F4Ú60 ¤ Ä B. Widrow X 1967
¤ * 0 ? w é (Least Mean Square, LMS)8 F2 Ä1Ç# [2] Ä ` 1970 ¤ È ‡ ' 4*6
*6AêÊõFO …È 9 ¸ J C æ ¼ –65#¼ • `B N# Î j1Ç # .D0¦ È ƒ'f X!” { } • 9 A .D

0¦65 * ¶ * \,´ Î j1Ç# ö I Ä 1969 ¤ ÈCapon * 0 ? é a-O ý Ä (Minimum VarianceDistortion-less Response,MVDR)1Ç# [3] È ¦ Ï*6 _ Añ- 7 é AB N# a-O È ¯ V š B N# 'EÃ * k Ï)· 0 ? È X4Ö • ' & ;"r@ Ç ` L} š B N# ' [3] Ä

8 F2 Ä# • @ '<-'f B3 ¤ sGý. Gÿ È ² Ì O K ' é A `AÑ = ö J ,8$B N# Î j W7- U — ;L} È j ¶ { =F 0 :1 È 08\ Š# _ MB Î Ð Z4Ö • ' & È 1972 ¤ Frost *4ï W4Ö • 0 ? é (Linear Constrained Minimum Variance,LCMV) ö I [4] È¦ * \ Ï*6 _ X4ï W4Ö • ' & ; Añ ' kEÃ * Ï)· 0 ? Èþ Ï*6@ Ö • -;B ö I!" - _+a }M' `E÷,´ MVDR ö I iF Ç ` Ä 1982 ¤ Griffths ¼Jim X LCMV *.p : E •Lk Ž . Le È * 0/ý ¯ y ñ+ -(#¸ ˜ (Generalized Sidelobe Canceler,GSC)[5] Ä³ _# • @ '1Ç # ,´ 0/ý § ƒ Î)à5 ´ È º V4Ö •8 F2 Ä sGý. GÿEœ F j 4Ö •8 F2 Ä sGý. Gÿ È F g Š,´ - 4 _L} ~AÑ1Ç5$ Ö È ÿ ?F 1ÇGÿ ÈF¯ } w 2. Le"rF6 È p ¯# Ä+X ¾ 4/ý Le G ' 4*63+5 Ä ¯+X :1Ç# 4*6 > ý ˆ X!»+‰ š @ 6 È j!" Zelinski X 1988 ¤ * :F 1Ç# *.p : Î Ð >5ž% # ,´1Ç# [6] È3W Õ-pMcCowan ¾ 2003 ¤ >˜ ¶ 01÷ iF >5ž% # ,´ ·1 [7] È x Ì 08\ È þ ÎLu Ä+X •-;F 9 = AL NÈ Ä

` ¶ 2000 ¤,´ & I H. Saruwatar * 0/ýJ¸ ) é A W ¢ ,´8 F2 Ä# • @ '1Ç# [8] ÈY+X# • ) ö- 7B$B ê6< Á f ¢ é A • Î)àB N# Î j Ä 2002 ¤ Cohen¼ Berdugo * 0/ý 0 ? ) Ba a-O,´# • @ '1Ç# [9] È Y+X GSC 5 ´ Î)à ÈB 1Ç# •F2+X ¾MŽ £0c š )ß ³ Èv _5j&é _5 ´ = r D õ @ ãMŽ £0c6ü Ÿ š Ä< 0 ¤ R. Bala ¼J. Rosca * ' `AÑ 6@ • Î)à# • @ ' [10] È"r ˜FJ V ¼ 0 ?-( } T/ý Q ? ; ',´ = BBa È { > Õ 0 Z < 1% # ˜ F65+X 0 £5$4ã% # ˜ Ä 2003 ¤ Z. Yan ¼L. Du * 0/ý X0+ Ø3+5 ] Y+X üTÖ {Nþ Î)à ë$' ý ¼L} š,´1Ç# [11] Èv _$' ýE³ W & x Ì • Ä< 0 ¤ È J. Cho ¼A. Krishnamurthy * 0/ýF2+X ¾0+ ØE–E-3+5 ,´Ba-( ÿ ¼# • @ '1Ç# [12] È <-'f ëL" 0 Ê,´6ü Ÿ š È v _ )B N# V •,´ • _ = = W • T È E • = AN# € š ÈUGý ¡ ý ¶B N#Aö [ Ä C. Choi X4ÿ ¨ &F --( Ð *.p : iF * 0/ý8 F2 Ä GSC 5 ´ [13] ÈÎP¼Añ > X$' ý &L$ . ¼E³Q š" õ å ;B N#Aö [ 9 ¶ ; Q Èv _B é# D /ë ÎLu Ä+XF 9 0!å = ?,´D /ë È T ¦ XF j ' & ; i \ =F2+X Ä 2004 ¤ T. Sekiya ¼T. Kobayashi • _ þBa-( ÿ1Ç# 9ç Ç _ [14] È X!" *.p : iF ¶ š `AÑ1Ç# Èv _ Í M' d E •N# € š ,´L NÈ Ä < 0 ¤ I. Slimene * 0/ý Y+X ?# ' ¼ J ?# ' ´ *?ò#{ é0; ¦"r@ Ð s3+ ,´1Ç# [15] È ÎD%Añ > Î j x Ì 9 i ´ È v _ = > n Ä 2005 ¤ D. Halupka * 0/ý X ~ š" ' & ; Y+X T ZTÖ {Nþ Õ f `,´ '-( } ŸAîAÑ % # ˜ • Î)àQ š" Î ,ú,´ é# [16] Èv _ ÎP¼Añ > • õ õ7- Q š" È) ¢ ¼$' ý"Ñ 9 z a Èp ) ¾ >1 B N#Aö [ x Ì ÎCX w Ä 2006 ¤)» ÜMN * € V8 F2 Ä#

• @ ’ 1Ç# ëL”)ß ³ š Î)àB N# Î j ÈB é# X GSC 5 ´ { >,´% # ˜G 6 Î Đ € V 4*6 G 6[17] È÷XE÷G÷ g!“ VB3 fE÷%NÁV • Q ˜NÁ V È< &F¯ } ¶ € V {L$,´ ¢ È ø Y+X ¶ € V £ w-( £ - × f JFJFƒ š ëL”$' ý ÈÎP¼Añ >B é# " 08\ é# L} š x Ì - Ä 2007 ¤ D. Halupka1y * ¶ 0/ý ~ Ï6G üTÖ {NþB N# Î j1Ç# [18] È X 5F0; FkEÁL Le G(Field Programmable Gate Array, FPGA):+X ‡ ' 4*6 ˜ (Digital Signal Processor, DSP)Î)à È < &F 9 $À#{ A Ï7- È Y+X = <D '-( } AîAÑ% # ˜ Î)à Q š" Î,ú È k?±FJE÷ Añ ~ š" @ 6EÃ * Ï)· 0 ? • Î)àB N# Î j,´- ,´ Ä 2008 ¤ M. Gupta ¼ Scott C.Douglas * 0/ý Y+X 8 TÖ {Nþ ' 8 F2 Ä-( £3+ 5 8 € V 6 @ ,´ é# • Î)àB N# Î j [19-23] È ¦ ] 5 +X Õ f ' & -( £(© ± l 6@ •AîAÑ% # ˜ È Y+X * ¾ '0ªL$ 6@ ,´ Ï*6 ëL”6ü Ÿ š Ä < 0 ¤ È »E¹ ¼ H £ * 0/ý 0Lf 6TÖ {NþLe GB N# Î j,´ é# [24] È k?± 6 9 Z!•PÔ ÈOÆ x _ Y+X `Eî &L$ (Time Delay of Arrival, TDOA) ¯ * Ê &F ò Ç ` 8 F2 ÄB3 ¤ × ¦!Q Y+X 6Le G (Different Microphone Array, DMA)F >|AÑ1Ç È k?± Ï*6 _ * ¾ 0 ? w é i ~NÁ>• ¯ × 0 > _ Y+X >5ž% # ëL”!» ‰ š Ä 2010 ¤)» ÜMN ÃG £Cµ ¼ d#Ë * 0/ý í V# • @ ’B N# Î j 1Ç# [25] È x+X ?# ’ 6@ % # ˜4ô 6 V 9 š ,´ B N# ' ' ` ?# ÈEÃ * ?# 3+ È Y+X GSC5 ´ Î)à È 0 > ½ Y+X ?# 8 @EÃ * Ä < ¤ È Chih-Chia Yao *8 F2 Ä $' 8% # ˜ [26-28] È £ ?# % # 5 8Ba-( ÿ1Ç# È …) ¯+XBa-( ÿ & =F2+X ¾ ~ š" õ å È6< DF C E •N# € š È …) Y+X ?# ’ )Q NÁ ' x ÌE³ È Œ655, 863<• { > Y+X 0 Z }5ž Q2ú/Ž4ÿ5•5 6 T65 9 x5 8 Ä

2011 ¤ ÈPœ ƒM * 0/ý ¼5$)ß ’TÖ {NþLe GB N# Î j1Ç# [29] È Q ¶8 F2 Ä# • @ ’ ) •# é A (Direction of Arrival, DOA) `AÑ ÈB 1Ç# k?± Y+X ¶NÁ)·6Š 8 ° _ ¯ NÁ XFJ V µC» ¾0´ V È ÿ ? ¶B N# a-O Ä 2014 ¤ S. Mirsamadi ¼ John H. L. Hansen * 0/ý 6 3 ?F jB N# Î j ¼Aö [1Ç# [30-33] È k?± Y+XMŽCO. Le ¼ PGÿ 6@ § Î)àL} š ¼ ë$' ý È XAÑ1ÇB Ba . & ø Y+X :00+¿>˜/j Ä 2015 ¤ »UÉ ¼ ¾ U ¼5 8 GSC ¼Ba -( ÿ Î)à# • @ ’ [34] È > žFJBa-( ÿ1Ç# " 9 0 Ê,´ i ´ Ä 2016 ¤ Y. Huang1y * 0 /ý Y+X T ZTÖ {Nþ `AÑ >5ž% # 3+ F >| Î j,´1Ç# [35] È ¦+X 0 ? ¼ ˆ# "r@ ÈB 1Ç# 9 T W H&é È 0 _7- O@ ã&é ¢ $À × ¼ _ X p 9TÖ {Nþ ] +"r 0 ? ¼ ˆ@ Ä 2017 ¤ O. Schwartz ¼ S. Gannot * 0/ý F2 8 ¾ J ZB$B ê,´ * ¾ LCMV # • @ ’ ¼ >5ž5$4ã % # ,´B N# 6/ë ¼L} š1Ç# [36-41] ÈB 1Ç# Y+X4ï W4Ö • ú `AÑ,´ J ZB$B ê ` = <TÖ {Nþ,´ PFB - " • 6/ë = <B$B ê,´B N# È { > Õ 0 Z >5ž% # • ëL”!»+‰ š È Î P¼Añ >B 1Ç# X ¢ Á f ¼L} š éM’ x Ì ¸ - È7- w 10-15dB ¢ š " (Signal to Interference plus Noise Ratio, SINR) Ä

### 1.3.2 语音重叠帧检测

B N#Gý W a _ J Z ê X < 0 W & kB$B ÈM0?± Y+X1Ç# ® * … $À j ¼Gý W j ÄF XB$B ê 6 ¢ ÈB N#Aö [ ¼ Î j ]4ÿ h>Û+X ` È • _ ¸Gý?±,´ 0!• Ä 1998 ¤ È R. E. Yantorno >˜ 01÷ £ ¾.D0¦Gý W ð#{ ¼B$B êAö [,´ ·1 [42] È Y+X4ï WN´#{ BBa3+ (Linear Predictive Cepstral Coefficients, LPCC)•.ž Ê 9 xB$B ê È ¦ * 0/ý à é# F >| 9 xB N# FB N# Á f Ä 2000 ¤,´ & I ø * 0 Z ² % Ba-( £ Bg" (Spectral Autocorrelation Peak to Valley Ratio, SAPVR)[43] È Y+XB ò )Gý W ¼ …N# W F >| T Ý ¼ 6 À Ä 2001 ¤ Ananth N.Iyer ¼ R.E.Yantorno X Ï x *.p : Î Ð!» " 1Ç# F >| …N# W j - -“ 7Aà,´.D0¦ [44] Ä > • ø iF ¶ SAPVR 1Ç# [45] È x Y+XBa £ – Ö ® *#zN# W È ½"r SAPVR È ÎP¼Añ > …N# W,´5 Ì . x)à z!“ V> ÿ È6<Gý W ,´5 Ì .C» ¾ £ – Ä 2002 ¤ Ananth N. Iyer ¼ R. E. Yantorno X Ï x é# :F >| ¶ iF È Ð •4ï WN´#{5F.1,´!•PÔ [46] Ä 2004 ¤ ø * 0/ý Y+X4ï W T [ 6 À 4ï WN´#{ BBa3+ (© ±,´1Ç# [47] È { >5 8Q ß$' 8 Q » )B N# WF >| 62« Ä 2006 ¤ M. H. Moattar ¼ M. M. Homayounpour )· x * Y+X#zN# W,´ * ˜ O ë `AÑB N# W _ V jGý W [48] È AÔ jF Ë#zN# WGüM’NÁ x)àMŽ ˜ O,´ _Gý W ÈB é# AÑ1ÇGÿ ? ÈFO Ö È v ö.ž)· =Q Ä < 0 ¤ È Robert M. Nickel ¼ Ananth N. Iyer F >| ¶ …N##k Ø j (Exclusive Activity Period, EAP).D0¦ [49] È Ê y ¶ ¢ " F 0 ² % ÈAÑ1ÇB lF >| T Ý 6 À Ä

2007 ¤ Ananth N. Iyer ¼ R. E. Yantorno * 0/ý1° … é# F >| - -“B$B ê3R E [50] ÈB é# * ¾D /ë ÈOÆ x *0û T Z € Q »+X • >˜ = <,´B$B ê È'f > Y+X L€ 0 ? D /ë 6 € Q » iG} ` T Z ò63B$B ê Ä { > ø iF ¶B 1Ç# È x.ž ÊB$B ê - È 'f > ¯+X!» " 1Ç# (Residual Ratio Algorithm, RRA)F >|Gý W ð#{ Ä 2012 ¤ È Arnaud Dessein ¼ Arshia Cont ¯+XMŽCO. Le 6@ )Gý B N# WF >| ð#{ [51] È XN#NÁ#qF >|3+5 6@ ` &L$ Q ¯ { } xF >|7a j – • ÈB é# 5j&é _ 6@ &5j • × f È £ 6@ ,´00+¿ W ¼ ² … È ],´L NÈ Ä 2014 ¤ Ananth N.Iyer ¼ R.E.Yantorno ø Ò0¦ ¶MŽ ò Q » ¼Q ß $' 8 Q » •F >|B$B êAö [,´ é# [52] ÈÎP¼Añ >B é# X ~ š)ß ³ ;7- O 9,® 6 { 3 q ,´ ö.ž)· Ä a X < 0 ¤ È N. Shokouhi 1y X … Fƒ JB$B ê j Ÿ ; * 0/ý € VB N# 4 *61Ç# [53] ÄB é# Y+X Gammatone % # ˜4ô 6EÃ •B N# 6 @ J Z € V ' È% # ˜EÃ * ½4ÿE÷ ‰ V-( ¢@ B3 > ~FJ% # \ ` * V È ½ Y+XNÁ)·B3 f Ç ` J Z ' È'f > 6 [ 48 Š8 -( £ Ç ` Gammatone € VNÁ)·B3 fBa(© ± È Œ65FJE÷ Ê y 0 Z% L} € • j 6 …N# W ¼Gý W Ä 2017 ¤ Maoshen Jia 1y * Y+X J $À Ê }1Ç# • Î)à …N# j ð#{ [54] È Y+X &NÁ ]B N# ',´00+¿ W ÈM•00+¿ @ 6 6 ÀF >| J $À Ê } ÈFJE÷ Ê } • j 6 = <,´B$B ê ÄB é# X ê ˆNÁ4qC Ø & J a x È ÎLu Ä+XE³Lî Ä

### 1.3.2 声源定位

* ¾TÖ {NþLe G,´ $À Ê } W ƒ : 6 j ; 92« Ö1\ 02« _ * ¾ 0 WEÃ * Ï)· ,´ ×# • @ ’1Ç# Ä% # > Ð s"r ¼ È-$ Õ × fLe G 7 A 0 Z7- O ¯# • § 9 0 WEÃ * Ï)·,´ é A ×1\ ¼2« _ * ¾ `Eî &L$ ,´1Ç# ÄÖÆ x"r * $À ` 4D TÖ {Nþ,´ &L$ È 'f >+a &L$ AÑ1Ç *D /ë È!ÿ T ZD /ë X 95$0ªL$Gü.ž Ê 0 Z ü "M’ È J )D /ë FJE÷ L3R F65 …. Aö .ž Ê $À,´0ªL$ }5ž È³ G- _ TDOA 1Ç# ×1\ 92« _ * ¾ Q 6EØ)·Ba `AÑ,´ Ê A1Ç# Ä"r@ TÖ {NþLe G 'L$-( £. Le • Ê * é A@ È Õ-p Y +X ¦ ³1Ç# "r * $À `TÖ {Nþ,´D /ë Ä $À Ê } 9'—- 7 $À,´ - 6 j … $À Ê } ¼ J $À Ê } Ä 9'— Ê },´?±"r 6 j $À Ê } ¼ $À#{ A Ä $À#{ A õ õ7- `AÑ Ç ` $À p X,´ é A È6< $À Ê } Ç ` § ƒ0ªL$ }5ž Ä

# Eî é A `AÑ a _ i ž G÷Lö `,´ ' `AÑ * é A@ Ä1960 ¤ Èê a 0 û ¶# Eî é A(DOA, Direction of Arrival),´.D0¦ Ä » ² È 1979 ¤ ÈSchmidt1y * ¶ JGý ' 62« (Multiple Signal Classification,MUSIC)1Ç# [55] Ä

## 1.4 本文结构安排

\ · ) #¸L” ¼B N# 6/ë é# F >| ¶.D0¦ ÈAê ·5 ´ ¹ Â ² ; Ö

(1) 1\ 01 k?± û4ý ¶F9NÈ,´ ? y Ã -( £ ° _,´ … ¶0; ¼ - µ F .D0¦)à(æ Ä

(2) 1\ ¼1 û4ý ¶ ' 4*6 *.p +X `,´-( £ œ ? ¼ ²)·. Aö Ã – #¸L” 1Ç# ¼ $À#{ A1Ç# Ä

(3) 1\ 91 B F WebRTCGü – #¸L”1Ç# Ã \ ·.D0¦,´ – #¸L”1Ç# ú ÎP¼ ¼5 Aê 6 À Ä

(4) 1\ 1 B F P5 # • @ ’1Ç# Ã \ ·.D0¦,´ * ¾ LCMV ¼ >5ž5$4ã% # ,´# • @ ’1Ç# ú ÎP¼ ¼5 Aê 6 À Ä

# 2 相关背景知识

## 2.1 信号处理数学基础

(1) Q ß 6 3 • !“ 1 6 3 È ³,´B +O Ç,ú ¾ W =U>U>,´ ç - Y } – æ Ã(™*6 – æ Ã5 AÑ – æQ ß Ä >Q ß 6 3 ²)· ö Ö - -( £,´ 0 ZGý?± Ê*6 _ ] ó ±L€ Ê*6 È ³ >˜F j Ö ) ¾ + ? 6 3 È ƒ í g g \Cã O W & ÈG- L€FlF ¾Q ß 6 3 ÄQ ß 6 3,´ ² )· ö Ö - j

$$f(x)=\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma}\mathrm{e}^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \tag{2.1}$$

¦ ] È $x$ j - 8 Gÿ È $\mu$ j – O K È $\sigma$ j – é ÄQ ß ²)· ö Ö - ,´ "4ï x)à *JÏ ’ È p ø>Û @ j JÏ ’ "4ï È ƒ $\mu=0$ D $\sigma=1$ &Q ß 6 3 a @ j ¶!“ 1 6 3 Ä E •. Le Gÿ > =Q ß ö Ö - j

$$N_c(\boldsymbol{x};\mu,\Phi)=\frac{1}{\pi^N \det(\Phi)}\exp\left((\boldsymbol{x}-\mu)^{\mathrm{H}}\Phi^{-1}(\boldsymbol{x}-\mu)\right) \tag{2.2}$$

¦ ] $\boldsymbol{x}$ _Q ßL¿ j. Gÿ È $\mu$ j ³,´ – O K È $\Phi$ j ³,´ Ï)·Ba ö Ö. Le Ä ƒ4ß ðB N# ' $s$ Œ jQ ßL¿ j. Gÿ & È ? (2.2) a j

$$f(s(p,k);\Phi_s(p,k))=N_c(s(p,k);0,\Phi_s(p,k)) \tag{2.3}$$

¦ ] $p$ >˜. & £0c ‘ & ;1\ $p$ W È$k$ >˜/jNÁ 3R E È $\Phi$ j

$$\Phi_s(p,k)=E\{s(p,k)s^{\mathrm{H}}(p,k)\} \tag{2.4}$$

: ? a _4ß ðB N# ',´ Ï)·Ba ö Ö - . Le Ä

(2) Woodbury. Le œ ? _ Maz A. Woodbury - =,´ È ³ 60 j $k$ ,´-( £. Le,´F6 . Le >˜/j j0 j $k$ ,´ Ï û. Le,´F6 ',´4ô 8 È £

$$(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{UCV})^{-1}=\boldsymbol{A}^{-1}-\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{U}\left(\boldsymbol{C}^{-1}+\boldsymbol{VA}^{-1}\boldsymbol{U}\right)^{-1}\boldsymbol{VA}^{-1} \tag{2.5}$$

¦ ] È$\boldsymbol{A}$ . Le _ $n$ >| $n$ G È$\boldsymbol{U}$ _ $n$ >| $k$ G È$\boldsymbol{C}$ _ $k$ >| $k$ G È$\boldsymbol{V}$ _ $k$ >| $n$ G Ä

$$\begin{aligned}
&(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{UCV})\left(\boldsymbol{A}^{-1}-\boldsymbol{A}^{-1}\boldsymbol{U}\left(\boldsymbol{C}^{-1}+\boldsymbol{VA}^{-1}\boldsymbol{U}\right)^{-1}\boldsymbol{VA}^{-1}\right)\\
&=\boldsymbol{I}+\boldsymbol{UCVA}^{-1}-\left(\boldsymbol{U}+\boldsymbol{UCVA}^{-1}\boldsymbol{U}\right)\left(\boldsymbol{C}^{-1}+\boldsymbol{VA}^{-1}\boldsymbol{U}\right)^{-1}\boldsymbol{VA}^{-1}\\
&=\boldsymbol{I}+\boldsymbol{UCVA}^{-1}-\boldsymbol{UC}\left(\boldsymbol{C}^{-1}+\boldsymbol{VA}^{-1}\boldsymbol{U}\right)\left(\boldsymbol{C}^{-1}+\boldsymbol{VA}^{-1}\boldsymbol{U}\right)^{-1}\boldsymbol{VA}^{-1}\\
&=\boldsymbol{I}+\boldsymbol{UCVA}^{-1}-\boldsymbol{UCVA}^{-1}\\
&=\boldsymbol{I}
\end{aligned} \tag{2.6}$$

Y+XF@!•-(#¸# F • "r@ P¼AñB œ ? _!“.ž,´ Ä

(3) . LeF6 E*6 œ ? È wAî)à 9. Le œ ?

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{B}+\boldsymbol{C}\boldsymbol{D}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}} \tag{2.7}$$

FÓ x 9

$$\boldsymbol{A}^{-1}=\boldsymbol{B}^{-1}-\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{C}[\boldsymbol{D}^{-1}+\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{-1}\boldsymbol{C}]^{-1}\boldsymbol{C}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{B}^{-1} \tag{2.8}$$

. LeF6 E*6 ¯# Ä+X ¾ 4/ý1Ç# Ø , ] È" ² ‘ D ,% # ˜ ] a+X `B 4 È \ ·1\ 1 •+X `!” œ ? Ä

## 2.2 回声消除背景知识

#¸L” 6 j – #¸L” (Acoustic Echo Canceller, AEC)¼+eD #¸L” (Line Echo Canceller, LEC)Ä >65 k?± _ X Ô ’ jFJ ° Ò g1 9 0 Z ¼ 4ïEœ ’ & ×+O È4ïD 6V 8 iG} J ,8$+X g X ƒ+eB & þ œ ˜ \ `8 !,´ N# È6< AEC 08\ _ X ƒ *B & ƒ 0 } È N#4ÿE÷ oL$ â + ý Ä ½!Q>ÛTÖ {NþG÷Lö þF 1 P • Ä AEC " LEC D ´ = r È-( ) $Lî ëL”,´(©&é È ëL” 9.œ & 4*6 ¼EŸ & 4*6 T/ý é ? Ä

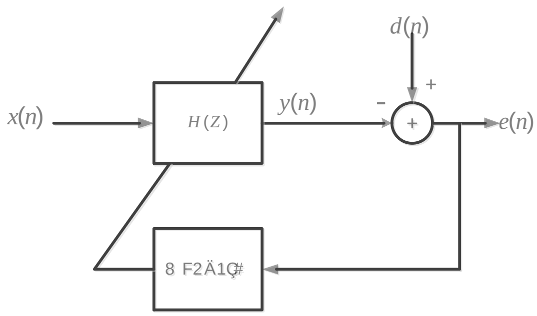
#¸L” ° _ *8¢,´ W7- "4ÿ @ Ï ¶ O,´ Á f ° _ È Á f 0 F-$ß ` : F4Ú 50 ¤ È ƒ &,´ k?± 7,´ _ › OFJ ]E³K¯,´ ' &F Ä-$ ` 1960 ¤ #¸L” þ AT&T CM D ÎP¼ Ô 0 û …C§ • È ` ¶ 1970 ¤ È+a ¾+e €>| J ° _"d £ L€ f ÈB ° _ ¦"Ñ 9 v+XC§ • Ä Õ-p AEC +X ` ¶ VoIP EŸ & ¼N#?öNÁ JAÞ3+5 ] È X \ `1 TÖ {NþG÷Lö `F 1 ' ÈF é P •,´ _F 1 ' È ƒF 1 ' P ` \ ` È { >4ÿE÷ œ ˜ Ý n < \ `B$B êB N# 0 <>ÛTÖ {NþG÷ Lö ` È ƒ &F Eî ` 0 Ê0; Ö & È P5 F 1 ÈF éB$B ê a J \ ` 5 [8 ! { }B$,´B N# ÈF a _ Ä #¸L” 0 j h+X,´ 9 0 ? w é (Least Mean Square, LMS)1Ç# Ã, 0 F 0 ? w é (Normolized LMS, NLMS)1Ç# úFB Ø 0 ? ¼ ˆ (Recursive Least Square, RLS)1Ç# Ä- } ¯+X 0 ¯,´ _5•N¥ Î &FJ 3+5 (Web Real-Time Communication, WebRTC) ° _Gü,´ AEC ÈBg!| 2010 ¤ fC] GIPS œ ( > È 0 n ¶ WebRTC 0;$À .1 Ä ƒ AEC +X¾0+ Ø1 & È a @ j0+ Ø – #¸L” (Acoustic Echo Canceller Mobile, AECM)Ä

-Lu+e 6„- ITU-T G.167 7 ö 7 * È + … #¸L” ° _8# A Š ` 6 L} ~ 45dB Äv _ A . Fƒ £ ¯Eî `F Z 7 ö Èý 7- \ ` È _ Z 0 * \,´ 7 ö È ITU-T G.168 *AÞGü 9 ¸ JAô ` #¸L”3+5 W7-,´ 7 7 Ä wAîTÖ {Nþ Õ f ' 9 0 Z+e £ È " ² _ -3dB È² ÌL} ~ 30dB I @ j -33dB Ä< ê6c7- \ `,´ N# W ?,´ Ø 193 $ _ 60dB È • a _B$ õN«L} ~ 60dB }7- O ¯ ê ¼ ˜ \ = ` Ä ² Ì #¸L” 30-40dB È _º7- GÿL} ~ j s 6 { 0 È ê6cF 7- \ ` Ä

#¸L”,´ V í 6 @ 2« È1\ 02« _0´ V Q ?NÁ)· Ö 300-3.4kHz ×1\ ¼2« _ í VNÁ )· Q ? Ö 0.05~7kHz ×1\ 92« _Cµ í V Q ? 50~14kHz ×1\ 2« _ ˜N# Q ? Ö 20-20kHz Ä

## 2.2.1 自适应滤波器

0 Z * \,´8 F2 Ä% # ˜ Ä § 9 . p/j5 ´ È ³ k?± 5 [ TG 6 È £ % # ˜ PFB - $H(z)$ ¼8 F2 Ä1Ç# Ä




. 2.1 8 F2 Ä% # ˜5 ´

Fig. 2.1 Structure of Adaptive Filter

. 2.1 ] w ÊEÃ • ' $x$(n) ¼ p O K ' $d$(n) _ í £0c,´ ÈFÓ x . ] : zG 6 ¼5$ 4ã% # ˜ _ 0 g,´ È . ],´B ¿ G ² ;>˜/j Ö

$$e(n)=d(n)-\sum_{k=0}^{M-1}h(k)x(n-k)=d(n)-\boldsymbol{h}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{X}(n) \tag{2.9}$$

¦ ] È $\boldsymbol{X}(n)=[x(n),x(n-1),\ldots x(n-M+1)]^{\mathrm{T}}$ _ ž AGÿ ÈF & ß Ö AGÿ œ ? ² ;

$$\hat{\boldsymbol{g}}(n)=\frac{\partial e^2(n)}{\partial \boldsymbol{h}(n)}=-2e(n)\boldsymbol{X}(n) \tag{2.10}$$

+a 0L‘ ;L}# Ç ` Ð s3+ ,´F œ ? j

$$\boldsymbol{h}(n+1)=\boldsymbol{h}(n)-\frac{1}{2}\boldsymbol{g}(n)\mu(n) \tag{2.11}$$

¦ ] È $\boldsymbol{g}(n)$ _ ß Ö AGÿ È $\mu(n)$ _F !•K¯ Ä

## 2.2.2 LMS 算法

LMS 1Ç# _ 0/ý1° … D ¯# Ä+X,´8 F2 Ä% # 1Ç# È _ X5$4ã% # *6Aê :F +X 0 L‘ ;L}# ,´ H F & h Ä 0L‘ ;L}# Y+XF 7- O Ç ` 0 H@ ÈF¯ } ¶-$ Õ"r@ È v _ ² Ì =7-2î.ž. Fƒ ß Ö AGÿ • 6 # F Äp Èj ¶ ¯+XF 1Ç# õN« `AÑ * ß Ö AGÿ Ä B 1Ç# 0 _+a B. Widrow ¼M. E. Hoff X 1960 ¤ *,´ È k?± M # _ Y+X-Ü & B 7-Gÿ / w éB 7-Gÿ ÈB 1Ç# =M0?±. FƒEÃ • ' ¼ O K ',´5 AÑ(© ± È ƒ }

& k,´ Ð s3+ _FJE÷ : 0 & k Ð s3+ ½ Ð : 0 ZCO w éB ß Ö,´" »N© Ç •,´ [3] ÄF /ý1Ç# ø>Û0 Œ Widrow-Hoff LMS 1Ç# È X8 F2 Ä% # ˜ ] Ç ` ¶ ¯# Ä+X È k ?± _ j ¦ § 9 Ï*61° … Ã ò A Ã f ‹FO Ö D C ¾ Î)à1y H&é Ä

Ê y!•K¯ $\mu(n)$ È08\ j h $\mu$ È XF ,´ & IF9+X Ê!• K¯ é# " E³1° … ÄF g 0 • Ð s3+ œ ? a J @F g

$$\boldsymbol{h}(n+1)=\boldsymbol{h}(n)+\mu e(n)\boldsymbol{X}(n) \tag{2.12}$$

FÓ xF a _ LMS 1Ç# 04ø Ç `,´Gý?± œ ? ÈB 1Ç# ø>Û0 ŒL¿ j ß Ö# ÄF 0!• 6 : ? i @ $ Ð-$ Õ,´ œ ?

$$\mathrm{h}_l(n+1)=h_l(n)+\mu x(n-l)e(n) \quad È l=0 ÈÈ. È M-1 \tag{2.13}$$

$M$ _% # ˜,´K¯ Ö È $n$ >˜F ,´ & k È $l$ _% # ˜3+ 1V ' Ä LMS 1Ç# k?± 6 !• È1\ 0 _ M û F È 5 % # ˜,´ M û l È% # ˜K¯ Ö ¼!•K¯,´Aî Ê Ä1\ ¼ _EÃ • ¼ â + ý Ä §0 Ç ` $y(n)$ Ä1\ 9 _+a O K ' $d(n)$ ¼$y(n)$ F 1Ç Ç `B ' $e(n)$ Ä1\ _ i ž ? (2.13) $ à% # ˜ Ð s3+ ÄGý =F !•-$ `% # ˜ f ‹ Ç ` 0 H Ð s3+ Ä

þ :!•PÔ -; * È LMS 1Ç# õ õ Y+X ¶EÃ • ' $x(n)$ ¼ O K ' $d(n)$ È ¦"Ñ 9 Y+X :EÃ • ',´8 -( £. Le $\boldsymbol{R}_{xx}$ ¼ Â-( £ AGÿ $\boldsymbol{r}_{dx}$ Ä þF •7--; *B 1Ç# F2+X ¾ =M0 ?± xP¼ Ÿ,´ j 8 Ä 0 éM’ È+a ¾ ³G÷+X,´ _F $ à,´ é ? È þ6< ¦ •F2+X ¾EÃ • 'MŽ £0c,´ j Ÿ Ä , i5 ÅF _ j8 F2 Ä% # ˜8 ! 9 – • ¼ F-DZ ,´ 7- Ë ÈF /ý Œ+X _ X , 8 ' £ $d(n)$,´ _ 1 ; } 9,´ ÄF øF 0!•Añ > ¶ LMS 1Ç# ,´ 1° … È² Ì ) ¾ Î ž •B$ È¦ ¼ @ 0!QF Œ õM0?± $2M+1$!Q ˆ# ¼ $2M$ !Q Ð# È • a _ $O(M)$ Gÿ4×,´AÑ1ÇGÿ ÄF !“ _LMS 1Ç# ¯ j Ä+X ,´ Ï Ä

LMS 1Ç# • _M0?± f ‹ ‘ &,´ È ='fF $ à J a x È8 F2 Ä% # ˜ – • > D DZ a J aCU Ä+a ¾EÃ • ' $x(n)$ _L¿ j ' ÈFÓ x Ç `,´B ' $e(n)$ • _L¿ j ,´ È³,´ £ é •% CãL¿ j ' È F g 0 • Y+X-Ü &B 7-Gÿ ' /B 7-Gÿ ',´ O K • `AÑ ß Ö AGÿ $\hat{\boldsymbol{g}}(n)$ Èõ'f J ¡ ý `% # ˜ Ð s3+ $\boldsymbol{h}(n)$ f ‹ ` 0 H% # ˜3+ ,´ W 7- Ä

6 ? (2.12) TEé < &"r O K

$$\bar{\boldsymbol{h}}(n+1)=\bar{\boldsymbol{h}}(n)+\mu \mathrm{E}\{e(n)\boldsymbol{X}(n)\} \tag{2.14}$$

6 ? (2.9) • : ? È Ç `

$$\bar{\boldsymbol{h}}(n+1)=\bar{\boldsymbol{h}}(n)+\mu \mathrm{E}\{[\mathrm{d}(n)-\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(n)h(n)]\boldsymbol{X}(n)\} \tag{2.15}$$

F 0!• Ç `

$$\bar{\boldsymbol{h}}(n+1)=[\boldsymbol{I}-\mu\boldsymbol{R}_{xx}]\bar{\boldsymbol{h}}(n)+\mu\boldsymbol{r}_{dx} \tag{2.16}$$

¦ ] È $\boldsymbol{I}$ _ … }Le Ä þ : ? -; * ÈF ,´0c Ê W ¼1Ç# f ‹FO Ö ¼ ˜ ÍC† ¾!• K¯,´F9 Ä

63<• ` $\boldsymbol{R}_{xx}$ _ )0 ,´8 -( £. Le È Y+X. Le 6@ Ç ` ² ; œ ?

$$\boldsymbol{R}_{xx} = \boldsymbol{Q}\Lambda\boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}} \tag{2.17}$$

¦ ] È $\boldsymbol{Q}$ _ 0 Z!“ ÔLe È $\Lambda = \mathrm{diag}[\lambda_0, \lambda_1, \ldots \lambda_0]$ _ 0 Z )@ Le ÈGüEé,´!ÿ Z s3PG- ) Ä8 -( £. Le,´(© ± l Ä 6 œ ? (2.17) V • œ ? (2.16) Ç `

$$\bar{\boldsymbol{h}}^{(Q)}(n+1) = [\boldsymbol{I} - \mu\Lambda]\bar{\boldsymbol{h}}^{(Q)}(n) + \mu\boldsymbol{r}_{dx}^{(Q)} \tag{2.18}$$

? (2.18)] $\bar{\boldsymbol{h}}^{(Q)}(n) = \boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\bar{\boldsymbol{h}}(n)$ È$\boldsymbol{r}_{dx} = \boldsymbol{Q}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{r}_{dx}$ ÈF a _ 0 Z 0Lf 6 é0; ÄB é0;,´ 0 >N© _ h N© È !” LMS 1Ç# 0c Ê W _+a ; ?,´ 6 é0; ã Ê,´

$$\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{hom}}^{(Q)}(n+1) = [\boldsymbol{I} - \mu\Lambda]\bar{\boldsymbol{h}}_{\mathrm{hom}}^{(Q)}(n) \tag{2.19}$$

? (2.19) ;@ 7,´ hom >˜ U€!Q é0;,´@ È : ? _ 0 Z6„0û@ ¦ 6 é0; Ä) ¾ ¦1\ $l$ Z é0; È ¦@ ² ;

$$\bar{h}_{l,\mathrm{hom}}^{(Q)}(n) = C[1-\mu\lambda_l]^n u(n) \quad l = 0, \ldots, M-1 \tag{2.20}$$

¦ ] È$C$ >˜ h È $u(n)$ a _ … }LfCó ¿ G Ä+a1y" G f ‹ ‘ & . È ?± Añ

$$|1-\mu\lambda_l| < 1 \tag{2.21}$$

FÓ x ¦!Q é0;,´@ 6L¿F !Q x 7 é ?> ÿ Èƒ> ÿ ` 0 & a7- O Añ% # ˜ Ð s 3+ f ‹ ` h Ä ? (2.21) ø 65 ) l1V ' ë ¹ þ6< Ç `

$$0 < \mu < 2/\lambda_l \tag{2.22}$$

j ¶ Añ!ÿ Z p 9,´@ G- f ‹F ?±% Cã

$$0 < \mu < 2/\lambda_{\max} \tag{2.23}$$

¦ ] $\lambda_{\max}$ a _8 -( £. Le $\boldsymbol{R}_{xx}$,´ 0 W(© ± l È : a _B 1Ç# 0c Ê W f ‹ ‘ & ¶ Ä

£ ¾B 1Ç# ,´ f ‹FO Ö È þ ? (2.20) -; * ?±1y" G,´ œ ¡N© $|1-\mu\lambda_l|$ Cº ? È FÓ x ¦!Q é0;@ > ÿ,´Cº È £7- O ¸ ,´ ÕF 0 l È8 'f6<'f1Ç# ,´ f ‹FO Ö • aCº Ä ² Ì œ ¡N© ]!•K¯ _ 0 Ê l È p ?± $\lambda_l$ ? È l f ‹FO Ö a J ’ Ä ò'— 0 ;0c Ê W ‘ & . È ƒ $\mu = 1/\lambda_{\max}, \lambda_l = \lambda_{\min}$ & ÈFÓ x $\mu\lambda_l = \lambda_{\min}/\lambda_{\max}$ Ä n'fB lCº ? È1Ç# ,´ f ‹FO ÖCº ’ ÈB lCº W È1Ç# ,´ f ‹FO ÖCº Ä 04ø Ç ` ;5 Aê È ƒEÃ • ' ,´8 -( £. Le,´ 0 W ¼ 0 ?(© ± lCº ÕF & È f ‹FO ÖCº Ä ý { È l f ‹FO ÖCº ’ Ä

j Añ% # ˜ 0 Ê f ‹ È8# A?±% Cã ? (2.23),´?±"r È p 9

$$\lambda_{\max} \le \sum_{l=0}^{M-1}\lambda_l = \mathrm{tr}(\boldsymbol{R}_{xx}) = Mr_x(0) \tag{2.24}$$

¦ ] $r_x(0)$ _EÃ • ' $x(n)$ ,´ k Ï)· È Aà Œ $P_x$ È I ? (2.23)F @ ² ; ' ?

$$0 < \mu < 2/MP_x \tag{2.25}$$

n'f È $P_x$ ã Ê ¶F ,´!•K¯ Ä

2.2.3 NLMS 算法

+a ¾ X LMS 1Ç# X8 F2 Ä% # ˜ ] Ä+X ¯# È p ê ' >§ ¾ iF B 1Ç# È 0 h ?ñ,´ a _ NLMS 1Ç# Ä þ : 0 ?8²,´AØAê . F*f* È LMS 1Ç# ],´!•K¯ $\mu$ ¡ ý ¶1Ç# ,´ f ‹FO Ö ¼ `AÑ2î Ö Ä6<!•K¯ $\mu$ þ œ ?(2.25) •-; ø ¼ ' $x(n)$ ,´ Ï)· 9 £ È p þ , 0 F,´@ Ö63<• È MB X.ž Ê!•K¯ &L” EÃ • ',´ Ï)· $P_x$ ÈF g 7- O Añ f ‹,´0c Ê W ø7- O ¼ ',´ Ï)· $P_x$ 1) 0û È þ6< Ð 1Ç# ,´ f ‹FO Ö [57] Ä

*f*!•K¯ $\mu$ = _ Ê I & È ? (2.9) a J @ ² ;

$$\boldsymbol{h}(n+1) = \boldsymbol{h}(n) + \mu(n)e(n)\boldsymbol{X}(n) \tag{2.26}$$

¦ ] È!•K¯AÑ1Ç œ ? ² ;

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{M\hat{P}_x(n)} \tag{2.27}$$

? ],´ $\hat{P}_x(n)$ _ $n$ & k `AÑ Ç `,´ ' Ï)·

$$\hat{P}_x(n) = \frac{1}{M}\sum_{k=0}^{M-1} x^2(n-k) = [x^2(n) - x^2(n-M) + \hat{P}_x(n-1)]/M \tag{2.28}$$

n'f È `AÑ,´ ' Ï)· $\hat{P}_x(n)$ _L¿ &L$ F,´ È ¦ D ¼ : 0 & k 9 ö 7,´6„3+ È 9 >.ž ,´FB Ø £3+ Ä < g È j ¶ Añ NLMS 1Ç# f ‹,´0c Ê W È ? (2.27)Gü,´ ò $\alpha$ ÄB X 0 ¼2 ,´93 $ µ Ä j ¶Lb!’ ' Ï)·E÷ ?6<+O @ 0 ZE³ W,´!•K¯ È 6 ? (2.27) i j

$$\mu(n) = \frac{\alpha}{M\hat{P}_x(n) + \xi} \tag{2.29}$$

: ? ],´ $\xi$ _ 0 ZMŽ h ?,´!“ Ä+a :F Z œ ? Ç NLMS 1Ç# ,´ 04ø œ ? j

$$\boldsymbol{h}(n+1) = \boldsymbol{h}(n) + \frac{\alpha e(n)\boldsymbol{X}(n)}{\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{X}(n) + \xi} \tag{2.30}$$

NLMS _ 0/ý , 0 F,´ LMS 1Ç# È 6 ˆ0 AGÿ $e(n)\boldsymbol{X}(n)$ -( ) ¾EÃ • AGÿ,´ £ é!W ?93 Š ¶ , 0 F ÈFJ h •B$ a _ 0/ý !•K¯,´ LMS 1Ç# È' LMS 1Ç# § 9 $ ,´ f ‹FO Ö È ¦ DD EÃ • ',´ Ï)· £ Ä+a ¾!•K¯ ¼EÃ • '. Le,´(© ± I 9 £ È6<(© ± I ¼-Ü & ' Ï)· 9 £3+ È+a ¾ ' Ï)· ¼!•K¯ @ ý" £3+ ÈF GüFJE÷ X 6!ý : Î Ð-Ü & ' Ï)· • Î)à Èj ¶F¯ }-Ü & ' Ï)·E³ ?,´ õ å ÈF GüF M0 Î Ð 0 Z!“ I F3+ Ä

## 2.3 麦克风阵列声源测向算法

### 2.3.1 传统谱估计法

P5 Ba `AÑ# OÆ xAÑ1Ç Ç `0ªL$Ba È ½ L3R pG ± W I • Ç ` •# é A È Bartlett # • @ '1Ç# 6 P5 µGü & 6 À Ø ¯ `TÖ {NþLe G žN¶ ÄB 1Ç# 7- O AñLe GEÃ * Ï)· X O K é A 0 W Ä Ê y $\boldsymbol{X}(n)$ _EÃ • ' È $\boldsymbol{w}$ _ sGý. Gÿ È O K é A j $\theta_0$ ÈFÓ x ' - j

$$\rho(\theta)=\arg\max_{\boldsymbol{w}}[E\{\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}X(n)X^{\mathrm{H}}(n)\boldsymbol{w}\}] \tag{2.31}$$

ƒ,- š Ï)· j 0 h ,´ ' & ; È D sGý. Gÿ93 j 1 ÈLe G#q '. Gÿ j $a(\theta)$ È0ª L$Ba- j

$$P_{BF}(\theta)=\frac{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{R}_{xx}\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.32}$$

i ž : ? ® *0ªL$Ba,´ ± l È ) Ä,´ é A £ •# `AÑ é A Ä 9 0 Z é A,´ ' ˆ X & ÈB 1Ç# _ >|,´ È ƒ 9 J Z é A ' & ÈB 1Ç# ,´ `AÑ W7- 6 U — ;L} ÄB 1Ç# F Le G ' @# • k+ í Ö ¼ é A 7 ,´ L€ f Ä

### 2.3.2 Capon 最小方差算法

j ¶ U>• :F 1Ç# ,´ 0 Ë =Cã È Capon * 0/ý1Ç# ÄB 1Ç# Y+XG 68 +a Ö X O K é A : ' @ 0 Z Le G# • k+ È Y+X ™ ‰ ' &¯M&L§ ) ö ¢ é A Ä B 1Ç# ø>Û0 j MVDR 1Ç# È¦ k?± M # _ Añ O K é A ' a-O ÈÁ f ¢ é A ' È³,´ œ ? ² ;

$$\begin{cases}\min\ \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}R_{xx}\boldsymbol{w}\\ \text{s.t. } \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}a(\theta)=1\end{cases} \tag{2.33}$$

A Y+X ù l G €# "r@ :F 4Ö • H FL NÈ È7- O 6 ¦Eœ F j 4Ö • H FL NÈ

$$L(\boldsymbol{w})=\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}R_{xx}\boldsymbol{w}+\lambda(\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}a(\theta)-1) \tag{2.34}$$

E • ù l G € $\lambda$ È"r@ : ? Ç `

$$\boldsymbol{w}=\frac{\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.35}$$

B 1Ç# ,´0ªL$Ba - ² ;

$$P(\theta)=\frac{1}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.36}$$

FJE÷AÑ1Ç : ?0ªL$Ba 6 3 - ,´ ± l&é • `AÑ •# é A ÄwAî6ü Ÿ š jQ ß,- š ÈFÓ xB - _ £ ¾ é A $\theta$ ,´ 0 W l'f `AÑ Ä > P5 Ba `AÑ1Ç# -(" ÈB 1Ç# ,´ 6EØ )· $Q È v =Cã { 4 X ¾ ¦M0?±AÑ1Ç. Le,´F6 È Î Đ ¶AÑ1ÇGÿ È F Ç Añ ¢ ¼ O K ' _-( Â) 0û,´ È 6< DLe G,´ …5 ´ ¼ š" • ¡ ý ¶B 1Ç# ,´0ªL$ 6EØ)· Ä

2.3.3 MUSIC 算法测向

Y+X ×# • F >|#{ A,´1Ç# FJ h ¸ 9 x Èv _ ¦ f ¾Le G# • k+ í Ö ¼ é A W 7 È þ6< 6EØ)· =Q ÈLe G j ( ¼ – P O ˜ - ¡ ý ¶ ¦ W7- Ä XLe G j ( ¼ P O ˜ - * Ê,´ õ å ; È $À#{ A7- OEî `,´ 0Q 0ªL$ 6EØ)· a _*Ž YL€ È CµE÷*Ž YL€ ,´ 1Ç# G- _Cµ 6EØ)·1Ç# Ä wAî"Ñ 9 š ˆ X,´ õ å ; È *0û2î.ž – Q » È Ç ` •# é A `AÑL NÈ,´ …@ È Schmidt 6 ¦ Ø ¯ ` 9 š ˆ X,´ h?ñ,´ õ å È ¦ D Ç ` F l@ È F a _ MUSIC 1Ç# ÈF • _ ' Ã š €0ªL$ é# OÆ!Q Ä+X X $À#{ A ] Ä B 1Ç# _ X0ªL$Ba `AÑ.D0¦ ¶ " : § 9Gü0;.Á ? y Ä

B 1Ç# § 90ªL$ 6 EØ)·Q È7- O `AÑ * J Z é A ' ÈMŽ hF2+X ¾ öLö » ')ß ³ ;,´ '#{ A Ä ¦ k?±!•PÔ _ 6 Õ f '8 -( £. Le $\boldsymbol{R}_{xx}$ F >|(© ± l 6@ È Ç ` ' € 0ªL$ ¼ > ¦!“ Ô,´ š €0ªL$ È'f > Y+X(© ± l 6 3?ô » 6F T Z €0ªL$ 6/ë 0 • È ® ` $M$ ZE³ ?,´(© ± l > ) Ä,´(© ± AGÿ È Õ-p )0ªL$Ba - F >| L3R `AÑ Ç ` •# é A ÈB 1Ç# ,´0ªL$Ba - j

$$P_{MUSIC} = \frac{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{U}_n\boldsymbol{U}_n^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.37}$$

B 1Ç# M0?± wAî 4Z é A,´ ' _ =-( £,´ ÈÕ f `,´ '8 -( £. Le% CãMŽ w 2 . Le,´ WCX È V I B 1Ç# 6 J a x Ä >5 ê ø * $ J iF ,´ MUSIC é# •F >| $À •# é A `AÑ È" ²"r i MUSIC Ã Ú)ß MUSIC Ã-( ¢ '$À MUSIC Ã4Ö • MUSIC ú# •0ªL$ MUSIC 1Ç# 1y Ä

+a ¾4ÿ ¨,´ MUSIC 1Ç# M0?±0ªL$Ba - F >| l L3R ÈF J ×+O ¸ W,´AÑ1ÇGÿ È 63<• ` 08\ l *)à X 6!ý jM& 4 È a Eœ F j JN© ?"r i ÈF 6< ÿ AF 1ÇGÿ È • a @ ¶ "r i MUSIC 1Ç# Ä+a ¾ X"r@ E÷0; ]M0?±+X ` < 0L$D È DLe G#q ’ õN« j-$ 4ï ÈuB 1Ç# õF2+X ¾1yL$D 4ïLe Q» ÄB 1Ç# > 4ÿ ¨ MUSIC 1Ç# -(" § 9 AÑ1ÇGÿ A È 6EØ)·Q ,´ H&é È6< DF2+X ¾ ~ š" ‘ & Ä

Ú)ß MUSIC 1Ç# 7- O < & Y+X : G÷Lö ',´NÁBa-( £ W ¼0ª -( £ W Ä § ƒ Š# _ 6 MUSIC ¼NÁBa-( £ W5 8C§ • È ?± O K ' ¼ ¢ ',´L$LÄ ? ¾B 1Ç# ,´0ª L$ 6EØ)· È a ö.ž `AÑ * O K é A ' È6< DB 1Ç# = • 4 ' - ,´L€ f Ä w

AîLe G Õ f O K ' XNÁ)· $f_\alpha$ 4 § 9NÁBa-( £ W È6< ¦ ³ ' XB NÁ)· 4 = § 9-( £ W ÈFÓ x Õ f. Gÿ >˜/j j

$$\boldsymbol{u}_\alpha(t)=\sum_{i=0}^{M}a(\theta_i)s_i(t)+\boldsymbol{n}(t)=\boldsymbol{AS}(t)+\boldsymbol{n}(t) \tag{2.38}$$

4ÿE÷ Ø , ÇB 1Ç# ,´0ªL$Ba - j

$$P_{CMU}(\theta)=\frac{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{a}(\theta)}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta)\boldsymbol{U}_{n,\alpha}\boldsymbol{U}_{n,\alpha}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta)} \tag{2.39}$$

é A@ $\theta$ j8 Gÿ )0ªL$Ba - F >| l L3R £ Ç ` $M$ Z ' ,´ •# é A Ä

# •0ªL$ MUSIC 1Ç# 5 8 ¶# • @ '*6Aê ¼ €0ªL$*6Aê È x Y+XLe G ' ' @ J Z# • È Õ-p )8 -( £ 'F >|(© ± l 6@ Ä B 1Ç# k?± M # a _ X P5 ,´ •# é A ` AÑ1Ç# { }AîAÑ Z# • @ ' ˜ ÈN´ x ' @ 0 Ê,´# • È F g JEÃ * J Z# •,´ ' È F a-( ƒ ¾ x Š 0 ; ' é A,´2Ç `AÑ È ½F >|# Eî é A 2î.ž `AÑ ÄB 1Ç# § 9 ² ; H&é Ö -(" P5 L3R# AÑ1ÇGÿ ? È0ªL$ 6EØ)· $Q È7- O é ý $ W,´3+5 • È `AÑ2î Ö $Q 1y Ä 08\ õ åG- _ • 4 ' - A ¾Le s - È F gEÃ *,´# • Gÿ1y ¾ • 4 ' È -(" = Ð# • @ ' ˜,´ MUSIC 1Ç# 7- ÿ AF 1ÇGÿ È 0 éM' ³,´8 +a Ö •L¿ { ÿ A Ä Le G Q »,´8 +a Ö1y ¾Le s - ÿ ë 1 È6<B 1Ç# ,´8 +a Ö1y ¾ ' @,´# • - Ä !" È j ¶Eî ` 6EØ $M$ Z '$À ÈM0?± Q » ,´8 +a Ö8# A j $M+1$ Ä wAî)à X 4 • 4 ' _ = -( £,´ ÈFÓ x $N$ ZTÖ {NþG÷Lö `$M$ Z '$À,´ Q » j

$$\boldsymbol{X}(k)=\boldsymbol{AS}(k)+\boldsymbol{n}(k) \tag{2.40}$$

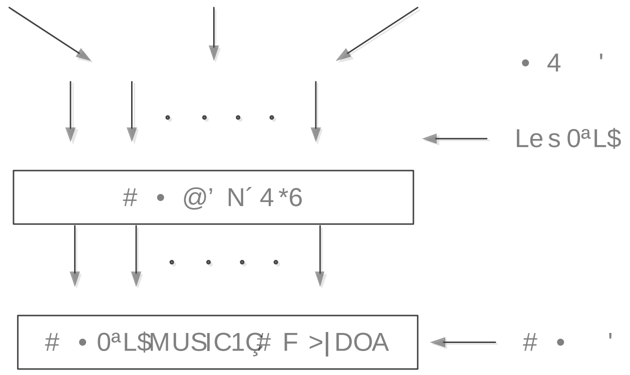
Y+X \1Ç# N´ x4ÿE÷ 0 Z# • @ ' ˜ > EÃ * j

$$\boldsymbol{X}'(k)=\boldsymbol{B}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{X}(k) \tag{2.41}$$

: ? ] $\boldsymbol{B}$ _ $N\times M$ ,´# • @ ' Ð s. Gÿ. Le È ³EÃ * j $M$ Z# • Ä : ? 6 $N$ ZFJ Fƒ ' ' j $M$ Z# •EÃ * Ä 6 $\boldsymbol{X}'(k)$ Œ j ¦ MUSIC 1Ç# ,´EÃ • a Ç `# • 0ªL$ MUSIC 1Ç# È j ¶ $ Ð$5 ,´*6@ 5 8# • @ '*6Aê,´0ªL$#{ A1Ç# È Lt : B 1Ç# ,´ #q0; . È ² . 2.2 p/j È k?± 6 T!•C ÈM0?±63<•,´ s3P 9 • 4 ' ÃLe s0ªL$ ¼# • ' Ä • 4 ' þ = < é A ` • È'f > 6 ¦Eœ ' `# •0ªL$ È4ÿE÷# • @ 'N´ 4*6 È Y +X# • ' ¼# •0ªL$ MUSIC 1Ç# F >| DOA ÈB 1Ç# <-'f FJE÷# •0ªL$"r * &F È F 6<"r * •# é A Ä

j ¶ $ ,´ `AÑ * 4 • 4 ',´ é A ÈF X!" *.p :F >| iF ÈFJE÷L} ~EÃ • '8 -( £. Le,´5$ Ö • ÿ ?F 1ÇGÿ Ä iF >,´1Ç# < g 6 T Z!•PÔ ÈOÆ x _2Ç `AÑ È F9 G 6Le s ' @ 0 Ê,´ í# • ÈFJE÷ ¯!ÿ Z# • í • ' - :,´ ÿ A ÈF g •7-

9E³ W,´?¶- 93 $ È Õ-pF >|2î.ž `AÑ È X : 0!•2Ç `AÑ93 $ µ ’ @ Z0´# • Ä :F T!• 05 8 a JL} ~8 -( £. Le,´5$ Ö ÈF 7- Añ ¸Q ,´ 6EØ)· Ä




. 2. 2 # •0ªL$ MUSIC 1Ç# #q0;

Fig. 2.2 The Process of Beamform MUSIC Algorithm

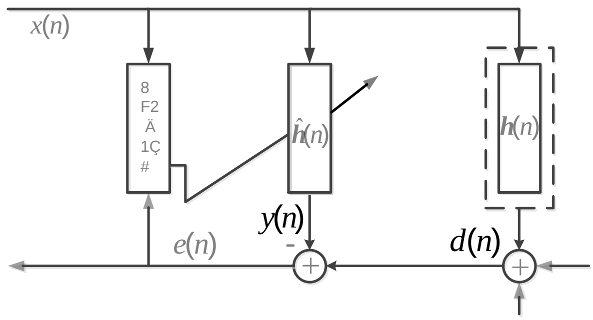
: a _ h+X,´ /ý MUSIC F >| J $À#{ A,´ é# È4ÿE÷.D0¦ )à ÈF Ë Q »G- _ X $' ý ‘ & ; *0û,´ ÈÎLu Ä+X ] ƒEî ` ]1y0; Ö F $Q $' ý & ÈF Ë1Ç# a J a x Ä XF j 9$' ý õ å ; ÈF Ë é# F M0?±F 0!•,´ iF È F65Gý * à Q » È þ6<.D0¦ *R± W $ j,´ é# Ä

# 3 声学回声消除

## 3.1 基于 WebRTC 的 AEC 算法

### 3.1.1 算法简介

. 3.1 _ #¸L” – Q » . È ¦ \CX _ Y+X8 F2 Ä1Ç# AÝ4ó 0 Z Q » È 6F 1 ' $x(n)$ 4ÿE÷ `AÑ,´ Fƒ Ç ` $y(n)$ È 0 > TÖ {NþG÷Lö,´ F 1 ' $d(n)$ ÿ ë ` AÑ,´ ' Ç ` B ' $e(n)$ ÈF ï _ AEC 1Ç# Ä




. 3.1 AEC Q »

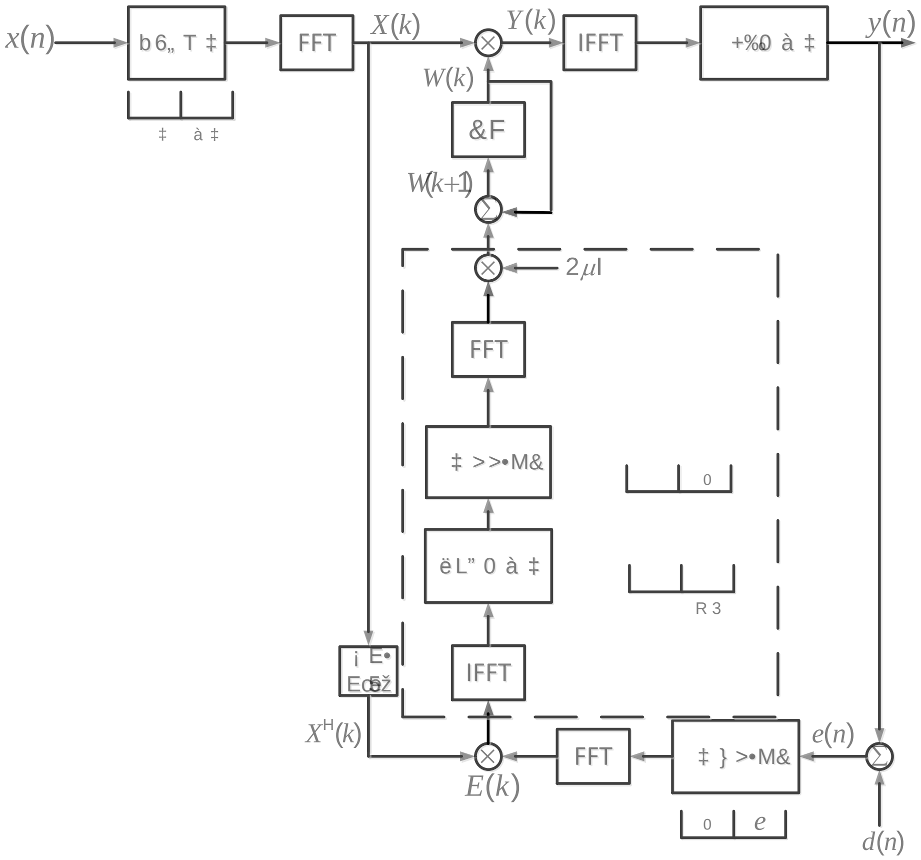
Fig. 3.1 AEC Model

j ¶ ï ¾*6@ NLMS 1Ç# ÈM0?± û4ý ü1 ð#{ (Double Talk Detection, DTD),´ ² % È ü1 ð#{ a _ ð#{F 1 ¼F 1 _ V 9 êB$B È M0?± ð#{ /ý(æ 1 Ö (1) õ 9F 1 B$B È!” & ˆ X ÈF & Y+X NLMS 1Ç# F >|% # ˜3+ $ à È8 F2 Ä% # ˜ f ‹ × (2) õ 9 F 1 B$B È!” & = ˆ X È =M0?± AEC 4*6 × (3) ü1 G- ˆ XB$B È!” &% # ˜3+ * F È ëL” × (4) ü1 G- = ˆ XB$B È =M0?± F >| AEC Ä y 98 F2 Ä% # 1Ç# F = 7- ¼ ˜#¸L” È F M0O ÙMŽ4ï W 4*6 (Non-linear Process, NLP) Q ‡ Ä

### 3.1.2 AEC 算法流程

j ¶#¸L” $K¯ &L$,´ aM0?± $Q Lf ,´ 9L€K¯% # ˜ ÈF < & • J Î ÐAÑ1Ç Gÿ ÃL} ~ Î & W È j ¶ XF 965 {L$ ® ` £>‘ WebRTC 0;Gü AEC G÷+X 6 ‡NÁ 8 F2 Ä% # 1Ç# (Partioned Block Frequency Domain Adaptive Filter) È a _% # & 9'—!ÿ ‡ žF >| 4*6 È ¦ = _ 9'—G÷ g&é 4*6 ž Ä ² . 3.2 p/j È j ¶ ÿ AAÑ1ÇGÿ ÈM0?± Y+X Ú)ß §0 ¼4ï W §0 ,´ £3+ È 6 & 4*6 ` NÁ 4*6 ¦ Y+X FO µGü & ’ (Fast Fourier Transform, FFT) ¼ FO µGü &F6 ’ (Inverse Fast Fourier Transform, IFFT) ÄFJ h

M0?± Añ8 F2 Ä1Ç# ,´1y x% # ˜Cã OK¯ ÈF ?±"r & &Cã O ? È j ¶ Eî ` F T Z- ,´
6 $\boldsymbol{X}(k)$ ¼$W(k)$ 6 ‡ 4*6 È¯!ÿ ‡ ž NÁ ) Ä-( ˆ È 0 > ½-( Ð9ç Ç ¼ 6 ‡ } -( <
x Ì ÄF & $\boldsymbol{X}(k)$ M0?± 9 ‡6+EœÈ'f > ¼ $\boldsymbol{W}(k)$ ) Ä ‡-( ˆ È 6 k ‡ ,´-( ˆ5 Ì-( Ð Ç
` 0 ‡,´ ž $\boldsymbol{Y}(k)$ È $\boldsymbol{Y}(k)$ >• @ T ‡K¯ ž ½4ÿE÷ IFFT Ç ` & ' $y(n)$ Ä




. 3.2 Gý +‰ PBFDA #q0;

Fig. 3.2 Flowchart of Overlap-Save PBFDA

+a ¾ XNÁ ) Ä-( ˆ È X < g ‡K¯ ‘ & ; & 4ï W §0 J"‘ } 0 ‡ ž È j!”
$y(n)$ M0?± +‰ > 0 ‡ ž ÈF g 0 • È $d(n)$ ÿ $y(n)$ X ‡ µ ) Ä-( ÿ Ç ` $e(n)$ ÄF g Ç
`,´ ž #Gý à ' `NÁ M0?± X } 0 ‡>•M& È Õ ; •AÑ1Ç ß Ö È ½F >| IFFT Ç `
$e(n)$ È ) Ä ¾ $y(n)$ > 0 ‡ ž 9 x È p F & Ç `,´F Ì $e(n)$ 'M0?± +‰ } 0 ‡ È {
>>•M& $ à Ç ` $\boldsymbol{W}(k)$ Ä < g È ) • ' $x(n)$ •M0?± b6„ à T Z ž ‡ È Ð0Ç -
' `NÁ È ÿ ANÁBa"ôMb ¼ a-O Ä

3. 1. 3 远端和近端信号延时对齐

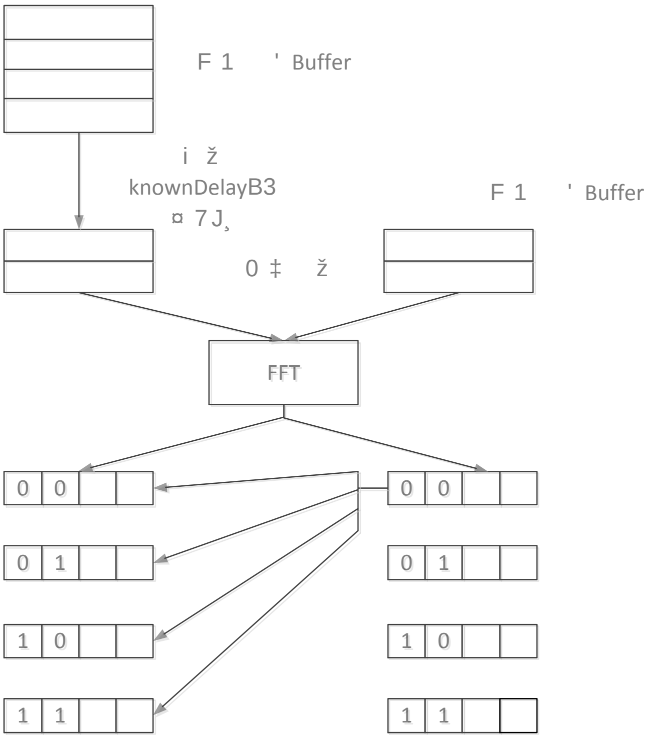
ƒ 4 ø 1 ¯ + X , ´ _Android 3 + 5 & ÈWebRTC Gü Ê y ¶ T/ý Q ? È 6 [ _ LowLatencyMode¼kHighLatencyModeÈ T/ý Q ? _ X WGÿAî 7,´#{P¼ *.p :F9 Ê,´ È 0; ¿ ] T/ý Q ?% # ˜K¯ Ö j 96msÈ T/ý Q ? qAè,´ 0 W &F 6 [ j 96ms ¼256ms È 0; ¿Gü qAè,´ 0 W & & _ 500msÈAî Ê,´U AÔ * Ê & & _ 50msÄ+a ¾8 F2 Ä% # ˜ _ XNÁ F >| 4*6 È é ý 0 Ê,´ `AÑ &F B È W J õ å ; =M0?±F >| ~ & & `AÑ È • 8 ! Aî Ê 0 Z * Ê l ÈF g = õ 8²-1F 1ÇGÿ È6< D •7- O 9 ¸ -,´ #¸ L" x Ì Ä ƒ X5•5 ]F >| PEÃ 9Q &F *)à & È G÷+X (Global IP Solutions,GIPS)OÆ ] 0 – æ Bastiaan,´ & & `AÑ1Ç# È Õ ; • û4ý WebRTC 0;Gü )B 1Ç# ,´ Ä+X Ä

ò63 TDOA ]G÷+X,´ ¯ y Â-( £# ú8 F2 Ä JFO)·5F@ .1 (Adaptive Multi-Rate Code, AMR),´ & & `AÑ1Ç# È # `+X-( £,´ M # • `AÑ &F Ä Aî Ê 9B N# j 1 ÈB N# ¸ a F"Ñ 9,´ õ å j 0 ÈF g,´F 1 ' ¼F 1 ' 4ô 8 * /ý(æ 1 (00) Ã(01) Ã (10) ¼(11) Ä(00)(æ 1B$ >F 1 ¼F 1 'G-" E³ a È (11)(æ 1B$ > _ üAâ õ å Ä (10)(æ 1B$ >F 1 ' j È vF 1 G÷Lö `B N# ¸ a ÈF /ý õ å ¸ A?ñ È j 08\FJ Aî 7,´ œ ˜ ¼TÖ {NþD /ë = J ¸F È • 9 7- _ TÖ {Nþ uLÌ F ê j Fž QTÖ {Nþ Ä(01)(æ 1B$ > "Ñ 9 È v _ ü é FJ & Â jF F 1 È p B (æ 1 • ¸ A *)à Ä > T/ý(æ 1 WebRTC U AÔ =F >| 4*6 È k?± M•} T/ý (æ 1 `AÑ &F Ä

6F 1 ' ¼F 1 ' 6 [ Š FFT ' `NÁ È X"r * Ï)·Ba È 6 @ 32 Z € V È ' `NÁ !ÿ ‡ ž j 65 &é Èdelay_estimate_wrapper.c & ] 9 Z - = j BinarySpectrumFloatÈB - Gü 9 Y+XF l-( £# "r & &,´ Ï7- Ä ³ F9 kBandFirst j 12 ÈkBandLast1y ¾ 43 È J - ) Ä ¾ 738-2646Hz NÁ)·93 $ È0; ¿ 9 T ‡ - È 0/ý _ Ê&é F >,´ È 0/ý _#ž&éF 1Ç È Ê&é F0; ¿5 nG- _ Fix È#ž&éF 1Ç - 5 n _ Float Ä !ÿ Z € VAî Ê 0 ZL8 l ÈCµE÷ L8 lAÔ j _ 1 ÈL8 l { ;,´AÔ j _ 0 È!ÿ ZNÁ&é,´ M ûL8 l _EÃ • ' Ï)·Ba ) Ä l ,´ 0 z Ä wAî :!QL8 l j threshold_meanÈ ƒ } Ï)·Ba ) Ä &é _ spectrumÈFJE÷ Ð s Ç ` àL8 l threshold_spectrumÈ :!QL8 l sGý j 63/64È ƒ } Ï)·Ba sGý j 1/64 Ä ¶ "F 1 ' ˆ X 0 ZK¯ Ö j 75 ,´ 32 } 4ô ] È ¶ "F 1 ' ˆ X 0 ZK¯ Ö j 16 ,´ 32 } 4ôGü È ƒ } l 4ô ; 7Aà j 0 È 6 0 ` •,´F 1 'Gÿ F l >F 1 75 Z 6 [F >| 9 } 2 F È'f >5 AÑ 1 ,´ Z ˆ X 0 ZK¯ Ö j 75 ,´ 4ô ] È F ?±F >| £% 4*6Lb!'0± Ä 5 AÑ1 ,´ - Cº W ÈB$ > T Z 'NÁBa-( £0; ÖCº ? È-( ý lAñ > -( £0; ÖCº W È • a _B$ `AÑ,´ &F $ ö.ž Ä j ¶F 0!•.ž &F `AÑ,´ ö.ž È 0;GüF Ð • ¶Eé+| l Ô 4*6 È ² Ì & & `AÑE÷0; ]5 AÑ 1 ,´ - G-" E³ W È

F & =F >| & &,´ $ à È ² Ì5 AÑ 1 ,´ - *)àE³ A,´ õ å È +X 0LfPœ D0 [ Q » • $ à & & Ä

. 3.3 _ i ž `AÑ Ç `,´ & & knownDelayB3 ¤F 1 ' Buffer 7J¸ ¼ F l -( £# "r & &,´E÷0; Ä




. 3.3 & & `AÑ#q0;

Fig. 3.3 The Process of Time Delay Estimation

### 3.1.4 非线性处理(NLP)

X NLMS 8 F2 ÄB38²Lf!å Èj ¶Lb!’ , 0 FB ',´NÁBaE÷ W È” 4 Î Ð 0 ZL L€ l È !“ hAî j $2\times10^{-6}$ ÈCµE÷L L€ l l 6L L€ lC{5 , 0 FB NÁ ' Ä ƒG÷ gNÁ)· j 8kHz & È!•K¯ stepsizeAî j 0.6 È16kHz ¼ 32kHz G÷ gNÁ)· ;!•K¯Aî j 0.5 ÄAÑ1ÇB ' ¼F 1 ',´ Â-( £Aà j cohde ÈF 1 ' ¼F 1 ',´ Â-( £Aà j cohxd È 1-cohxd ¼ cohde ,´ 0 ? l j hNlDe È hNlDe ,´ £ w l j hNlDeAvg • ã Ê Y+X5$4ã % # #¸L” !»+‰ ,´ Î,ú W ? Ä

ƒB 7-Gÿ seSum W ¾F 1 7-Gÿ sdSum & È a 6F 1 'NÁBaC{ l5 B 'NÁ Ba È ¦ 6 “ 7 } divergeState 5ž 1 È ² Ì seSum,´ 1.05 = ? ¾ sdSum & È l 6 divergeState 5ž 0 È ² Ì seSum W ¾sdSum,´ 19.95 = & È 6 sGý3+ . Le5ž 0 Ä £% %

# ˜3+ ¼ Á f3+ ¡ < Œ+X • $ à 04ø hNl % # ˜3+ Ä 04ø 6 NÁ B 'FJE÷B % # ˜ È Õ-p ¯+XGý -( Ð# ' = @ & ' È ¤ ƒ >0+F >| ; 0 ‡F Ä

+a ¾WebRTC,´ AEC ]"Ñ 9 DTD È6< AECM ] • = _ U l,´ DTD ÈF aFP @ ¶ 9 üAâ õ å *)à & ÈF 1 \ ` ' • J>Û z a È +J8#>Û#¸L"Ä

## 3.2 改进算法

### 3.2.1 分块频域自适应滤波算法

WebRTC 0;Gü AEC G÷+X,´ a _ ·)^ [58] ] 6 ‡NÁ 8 F2 Ä% # 1Ç# Äß 1Ç# -(E³ ¾& NLMS 1Ç# 9 T W H ï ÈÖÆ x W WL} ~ ¶F 1ÇGÿ ÈF _ j/ë " µGü & ' FJE÷ FO1Ç# FFT Î)à Ä1\ ¼ _/ë " µGü & ' ¼% # ˜5 ´ +O @F l =-( £,´ ' È £F Ë € V ' W ƒ :% Cã!" Ô W Ä !ÿ 0 Z8 F2 Ä Ð s G÷+X & !•K¯ È F g X ¤ Z% # ˜ µ f ‹ W 1 08$ Ä G p ˜. È ß Ö ;L}# ( 0L' ;L}# ),´ f ‹FO Ö _+aEÃ • '-( £. Le,´(© ± l 2 ã Ê,´ ÈF Ë(© ± l 6 [ ) Ä!ÿ ZNÁ&é,´ ' Ï)· Ä X!ÿ Z NÁ&é :Aî5ž ¼ ' Ï)· @ ý" ,´!•K¯ ) Ï)· GÿF >|>• ¯ ÈF g ¤ ƒ Q 1Ç# ,´ f ‹FO Ö Ä

Ê yEÃ • ' NÁ . Le j

$$\boldsymbol{X}(k) = diag[X_0(k)\ X_1(k) \ldots X_{M_b-1}(k)] \tag{3.1}$$

Ê yNÁ sGý AGÿ j

$$\boldsymbol{W}(k) = [W_0(k)\, W_1(k) \ldots W_{M_b}(k)]^{\mathrm{T}} \tag{3.2}$$

:F T Z ? € ] $k$ >˜/j ‡ ' È!ÿ 0 ‡,´ žK¯ Ö _ $2M_b$ È+a ¾ x ~ ß(© í g Ê*6 È NÁ ž } > § 9 ¡E• )0 W È F Ç63<•-$#q 6Gÿ È p ÎLuAÑ1Ç &K¯ Ö j $M_b+1$ È6 ‡AÑ1Ç XNÁ M0?±!ÿ ‡ ) Ä-( ˆ È% # ˜K¯ Ö j ‡ ˆ !ÿ ‡ žK¯ Ö Ä!ÿ 0 ‡,´ NÁ EÃ * AGÿ j

$$\boldsymbol{Y}(k) = \boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{W}(k) \tag{3.3}$$

FJE÷IFFT Ç ` $y(n)$ È+a ¾ 6 ˜ §0 ¼4ï W § 0 ,´ £3+ È +‰ > $N$ &éÄ$d(n)$ ¼$y(n)$ Œ Ç & B ' $e(n)$ Ä XB ' }>• $M_b$ Z 0 È ½4ÿE÷FFT Ç $\boldsymbol{E}(k)$ Ä

ò63 NLMS 1Ç# sGý AGÿ & >˜Eî ? ÇNÁ sGý. Gÿ

$$\boldsymbol{W}(k+1) = \boldsymbol{W}(k) + \boldsymbol{\mu}_f(k)\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k) \tag{3.4}$$

¦ ] È H >˜/j =. Le ¡E•Eœ5ž È $\boldsymbol{\mu}_f(k) = [\frac{\mu}{P_0(k)}\ \frac{\mu}{P_1(k)} \ldots \frac{\mu}{P_M(k)}]$ È$P_M(k)$ _ $M$ NÁ&é ' Ï )· È $\mu$ _ 0 Z h Ä FJE÷ ; ?AÑ1Ç

$$P_m(k) = \lambda_0 P_m(k-1) + (1-\lambda_0)\left|X_m(k)\right|^2 \tag{3.5}$$

¦ ] È $\lambda_0$ _F‡ € È WebRTC AEC1Ç# ] 0.85Ä

+a ¾ 6 ˜ §0 ¼4ï W §0 ,´ £3+ ÈF ?±63<•Gý +‰# È XNÁ 8 F2 Ä% # 1Ç# ] M0?±5 !Q FFT ¼ IFFT È , i5 Å _ sGýF œ ? ] ß Ö,´L€ f È v _NÁ 8 F2 Ä% # ,´7- W WL} ~F 1ÇGÿ È !”>Û ¯# Ä+X ¾ 0; ] Ä

### 3.2.2 联合最优 NLMS 算法

·)^ [59] * 0/ý à,´AÑ1Ç sGý,´F œ ? È 6 P5 NLMS !•K¯Gü T Z €6„ 863 <• Ä-( £,´ Ê y ¼ Ø , ² ; Ä

OÆ x Ê y$\boldsymbol{g}_n(n)$ j 0 w lQ ß,- š AGÿ ÈwAî $\boldsymbol{h}_{jo}(n)$ _ 0 w lL¿ j Gÿ ÈD% Cã 0 LfPœ D0 [ Q »

$$\boldsymbol{h}_{jo}(n) = \boldsymbol{h}_{jo}(n-1) + \boldsymbol{g}_n(n) \tag{3.6}$$

Ê y >P¼ aB3 œ ? j

$$\boldsymbol{\eta}(n) = \boldsymbol{h}_{jo}(n) - \hat{\boldsymbol{h}}_{jo}(n) \tag{3.7}$$

6 ? (2.22) ¼(3.6) • ? (3.7) a 9

$$\boldsymbol{\eta}(n) = \boldsymbol{\eta}(n-1) + \boldsymbol{w}(n) - \frac{\mu e(n)\boldsymbol{X}(n)}{\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{X}(n) + \xi} \tag{3.8}$$

wAîEÃ • ' WK¯ j $L$ È $K$ j W ¾1y ¾ 1 ,´ È $\gamma = 1 - \frac{1}{KL}$ È `AÑ š ',´ Ï)· j

$$\hat{\sigma}_v^2(n) = \left|\hat{\sigma}_d^2(n) - \hat{\sigma}_y^2(n)\right| \tag{3.9}$$

š ' $\boldsymbol{g}_n(n)$ ,´ Ï)· j

$$\hat{\sigma}_w^2 = \frac{1}{L}\left|\hat{\boldsymbol{h}}_{jo}(n) - \hat{\boldsymbol{h}}_{jo}(n-1)\right|^2 \tag{3.10}$$

`AÑ O K ' $d(n)$ ,´ Ï)· j

$$\hat{\sigma}_d^2(n) = \gamma\hat{\sigma}_d^2(n-1) + (1-\gamma)d^2(n) \tag{3.11}$$

`AÑ O K ' $y(n)$ ,´ Ï)· j

$$\hat{\sigma}_y^2(n) = \gamma\hat{\sigma}_y^2(n-1) + (1-\gamma)\hat{y}^2(n) \tag{3.12}$$

Ø , Ç% # ˜3+ $\hat{\boldsymbol{h}}(n)$ $ à œ ? j

$$\hat{\boldsymbol{h}}_{jo}(n)=\hat{\boldsymbol{h}}_{jo}(n-1)+\frac{\boldsymbol{X}(n)e(n)}{\dfrac{L\sigma_v^2}{m(n)+L\sigma_w^2}+(1+\dfrac{2}{L})\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(n)X(n)} \tag{3.13}$$

: ? ] $m(n)$ ,´ $ à œ ? ² ;

$$m(n)=\left\{1-\frac{\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{X}(n)}{L[\dfrac{L\sigma_v^2}{m(n-1)+L\sigma_w^2}+(1+\dfrac{2}{L})\boldsymbol{X}^{\mathrm{T}}(n)\boldsymbol{X}(n)]}\right\}\times[m(n-1)+L\sigma_w^2] \tag{3.14}$$

### 3.2.3 改进算法

WebRTC AEC Gü,´ 6!åNÁ 8 F2 Ä% # 1Ç# H ï X ¾AÑ1ÇGÿ ? È ï ¾ 0; Î)à È ¦ DAÔ j DFT >% # ˜ µ 4NÁ V ' § 9F l!“ Ô W ÈF9 NÁ ,´B ' ¼NÁ F 1 ',´ ˆ0 Œ j ß Ö Ä6„ 8 0 H NLMS 1Ç# _ X & Ø ,,´ È¦ H ï X ¾ üAâ ‘ & ; Í'f7- O Añ% # ˜ f ‹ È v _AÑ1ÇGÿ" NÁ 1Ç# WÄF Gü OH¤NÁ % # 1Ç# ,´ M # ÈXNÁ 66„ 8 0 H NLMS 1Ç# Ø , * à,´ sGýF œ ? Ä*6 # õ å _ iF 1Ç# 7- O < & 9F T/ý1Ç# ,´ H&é È ¦ DB 1Ç# = ÍC† ü1 ð#{ È X üAâ *)à & • 9-( )E³ - ,´ ëL” x Ì Ä

& NLMS 6 ‡ 4*6 sGý AGÿ $ à œ ? j

$$\boldsymbol{h}(n+1)=\boldsymbol{h}(n)+\sum_{m=0}^{M_b}\frac{\mu\boldsymbol{e}(nM_b+m)\boldsymbol{x}(nM_b+m)}{\boldsymbol{x}^{\mathrm{T}}(nM_b+m)\boldsymbol{x}(nM_b+m)+\xi}-1 \tag{3.15}$$

¦ ] È $M_b$ _ ‡K¯ Ö È $n$ _F !Q Ä & 6 ‡F 1 '% # > È ¦EÃ * ' j

$$y(n)=x(n)*h(n)=\sum_{m=0}^{L_b}x(n-M_b\cdot m)*h(n+M_b\cdot m) \tag{3.16}$$

¦ ] È WebRTC0; ¿ ] % # ˜ ‡ $L_b$ 08\ 12 F65 16 È(© [ õ å ; 32 ÄF g XNÁ FJE÷!ÿ ‡ ] $X(k)$ ¼$W(k)$ ) Ä-( ˆ È % # ˜K¯ Ö j 12×64G÷ g&é Èv _EÃ * &F 9 64 G÷ g&é È6< D Î Ð ¶F 1ÇFO Ö Ä+a ¾G÷+X 6 ‡ 4*6 È j ¶EÎ ` Ï •,´ x Ì ÈM0?± 6F 1 ' 6 ‡ È Ð0Ç È FFT > 9 ‡6+Eœ È'f >D !ÿ ‡,´ sGý AGÿ $W(k)$ ) Ä-( ˆ È ½-( Ð Ç ` $Y(k)$ Ä

Ê yF 1 G÷Lö 'NÁ >˜Eî ? j

$$\boldsymbol{D}(k)=\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{W}(k)+\boldsymbol{V}(k) \tag{3.17}$$

¦ ] È$\boldsymbol{V}(k)$ _š ' È <-'f $d(n)$ -$ Õ9ç Ç È v _ ? (3.17)X Õ ; • Ø , J+X ` Ä wAîNÁ sGý AGÿ _ 0 w lL¿ j AGÿ È% Cã1° … 0LfPœ D0 [ Q »

$$\boldsymbol{W}(k)=\boldsymbol{W}(k-1)+\boldsymbol{G}(k) \tag{3.18}$$

¦ ] È $\boldsymbol{G}(k)$ _ 0 w lQ ß 6 3. Gÿ Ä

ò'— PBFDA 1Ç# sGý $ à œ ? Ê y j

$$\hat{\boldsymbol{W}}(k)=\hat{\boldsymbol{W}}(k-1)+\frac{\mu\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k)}{P_{\boldsymbol{X}}(k)+\xi} \tag{3.19}$$

¦ ] È $\mu$ ¼$\xi$ 6 [ ) Ä = <NÁ&é,´ T Z hGÿ È $\boldsymbol{X}(k)$ _ œ ?(3.1) Ä $P_{\boldsymbol{X}}(k)$ _>˜/j ) Ä NÁ&é : $\boldsymbol{X}(k)$ ' Ï)· ÄNÁ 8 F2 Ä% # 1Ç# ] 9

$$\boldsymbol{E}(k)=\boldsymbol{D}(k)-\boldsymbol{X}(k)\hat{\boldsymbol{W}}(k-1) \tag{3.20}$$

NÁ 6 ‡ > È WebRTC0; ¿Gü $\boldsymbol{E}(k)$ ¼$\boldsymbol{D}(k)$ 9 x K¯ Ö j 65 È $\boldsymbol{X}(k)\hat{\boldsymbol{W}}(k-1)$ 9 ‡"r ¼ > 9 xK¯ Ö • _ 65 &é È ) Ä-( ÿ Ä

\ · Ê yNÁ !ÿ ZNÁ&é : >P¼ aB3 œ ?

$$\boldsymbol{U}(k)=\boldsymbol{W}(k)-\hat{\boldsymbol{W}}(k) \tag{3.21}$$

6„0û ? (3.17) Ã(3.18) ¼(3.20) Ç

$$\boldsymbol{U}(k)=\boldsymbol{U}(k-1)+\boldsymbol{G}(k)-\frac{\mu\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k)}{P_{\boldsymbol{X}}(k)+\xi} \tag{3.22}$$

Ê y $\beta_f=\dfrac{\mu}{P_{\boldsymbol{X}}(k)+\xi}$ È ) : ? T1 < & ¼93 Ç

$$E[\|\boldsymbol{U}(k)\|_2^2]=E[\|\boldsymbol{U}(k-1)\|_2^2]+E_1+E_2+E_3+\hat{\sigma}_G^2 \tag{3.23}$$

¦ ] È $E_1=\beta_f^2E[\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k)\boldsymbol{E}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{X}(k)]$ È $E_2=-2\beta_fE[\boldsymbol{U}(k-1)\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k)]$ È $\hat{\sigma}_G^2=E[\|\boldsymbol{G}(k)\|_2^2$ È $E_3=-2\beta_fE[\boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k)\boldsymbol{G}(k)]$ Ä

+a ?(3.17) Ã(3.18) Ã(3.20) ¼(3.21) Ç

$$\boldsymbol{E}(k)=\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{U}(k-1)+\boldsymbol{X}(k)\boldsymbol{G}(k)+\boldsymbol{V}(k) \tag{3.24}$$

6 ? (3.24) • ? (3.23),´1\ 2 N© ÈY+X Isserlis Ê*6 È < &#¸ ë =-( £,´N© Ç

$$E_1=\beta_f^2P_{\boldsymbol{X}}P_{\boldsymbol{V}}+(M_L+2)\beta_f^2P_{\boldsymbol{X}}P_{\boldsymbol{X}}\{E[\|\boldsymbol{U}(k-1)\|_2^2]+P_{\boldsymbol{G}}\} \tag{3.25}$$

6 ? (3.24) • ? (3.23),´1\ 3 N© È < &#¸ ë =-( £,´N© È Ç

$$E_2=-2\beta_fP_m(k)E[\|\boldsymbol{U}(k-1)\|]_2^2 \tag{3.26}$$

6 ? (3.24) • ? (3.23),´1\ 4 N© È < &#¸ ë =-( £,´N© È Ç

$$E_3=-2\beta_f^2P_{\boldsymbol{X}}P_{\boldsymbol{G}} \tag{3.27}$$

Ê y $M(k)=E[\|\boldsymbol{U}(k)\|_2^2]$ 6 ? (3.23)-(3.25)Gý à • ? (3.21) È Ç

$$
\begin{aligned}
M(k) = {} & [1-2\beta_f P_X + (M_L+2)\beta_f^2 P_X P_X] M(k-1) + \\
& \beta_f^2 P_X [P_V + (M_L+2) P_X P_G] - 2\beta_f P_X P_G + P_G
\end{aligned} \tag{3.28}
$$

j AñNÁ aG})· 0 ? È $M(k)$ ) $\beta_f$ ,´ , 1y ¾ 0

$$
\frac{\partial M(k)}{\partial \beta_f(k)} = 0 \tag{3.29}
$$

? (3.29),´ i j

$$
\beta_f(k) = \frac{M(k-1)+P_G}{(M_L+2)P_X[M(k-1)+P_G]+P_V} \tag{3.30}
$$

+a ¾$\beta_f(k)$ _ £ ¾ , 0 F!•K¯ ¼!“ l F ò ¼ s - Èp ? (3.28)7- < & Añ ¼65 6„ 8 0 H È ÐFO1Ç# ,´ f ‹ ÈL} ~NÁ 1Ç# ,´ aG})· Ä

6 ? (3.28) • 0 M Ê y ? (3.19) ] È Ç

$$
\hat{\boldsymbol{W}}(k) = \hat{\boldsymbol{W}}(k-1) + \frac{M(k-1)+P_G}{(M_L+2)P_X[M(k-1)+P_G]+P_V} \boldsymbol{X}^{\mathrm{H}}(k)\boldsymbol{E}(k) \tag{3.31}
$$

¦ ] $M(k)$ ) ÄNÁ&é$ à œ ? Y+X ? (3.28)AÑ1Ç È$V(k)$ ,´ ) ÄNÁ&é Ï)· œ ? j

$$
P_V = \gamma P_V(k) + (1-\gamma)\left|\boldsymbol{V}(k)\right|^2 \tag{3.32}
$$

$D(k)$ ,´ ) ÄNÁ&é Ï)· $ à œ ? j

$$
P_D(k) = \gamma P_D(k) + (1-\gamma)\left|\boldsymbol{D}(k)\right|^2 \tag{3.33}
$$

$Y(k)$ ,´ ) ÄNÁ&é Ï)· $ à œ ? j

$$
P_Y(k) = \gamma P_Y(k-1) + (1-\gamma)\left|Y(k)\right|^2 \tag{3.34}
$$

i ž ? (3.16)AÑ1Ç$G(k)$ ) ÄNÁ&é,´ Ï)· j

$$
P_G = \left|\hat{\boldsymbol{W}}(k) - \hat{\boldsymbol{W}}(k-1)\right|^2 \tag{3.35}
$$

## 3. 3 性能评估

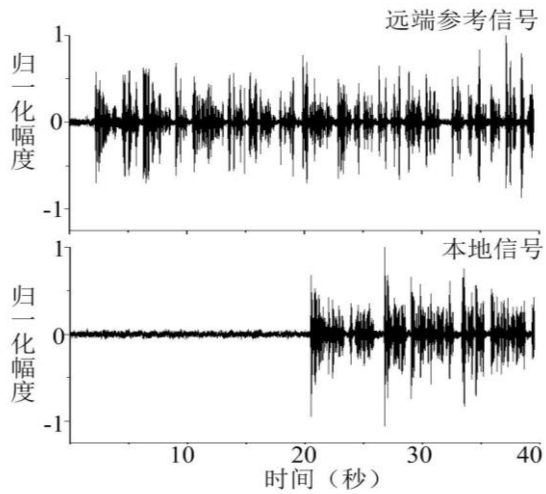
### 3. 3. 1 实验条件

\1 ÎP¼ pM0AÎ 7 j d D1DAà \TÖ {Nþ È ¼ @ ¶ ÎLu j Ÿ ; #¸L” È øAô ` ¶ MATLAB /-O ÎP¼ Ä p ¯+XTÖ {Nþ ¼ œ ˜+e £ ˜ 1V 8 ITU-T *AÞ P.340Ä \#{B <- Z G÷+XITU-T *AÞ P.501 ]?ô Ê,´(© Ê#{B ' È v _FJE÷ i ÎP¼ j Ÿ7- O9ç ÇD (© Ê #{B 0 g,´ x Ì Ä 5F0;B @0 j C B @0 È £ _9!(© DG§-¯ I3 ¼Win7 3+5 ÈLö @)ß ³ j

VS2015Ä …N#EŸ & jCool Edit Por2.0ÈG÷ gNÁ)·F9 j 8kHz È …FJFƒ16bit　ž È · &2« » j　.pcm F.wav Ä /-O &　oL$K¯ íQ　j　5m×6m×3m È$' ý &L$ Aî5ž j　200msÄ

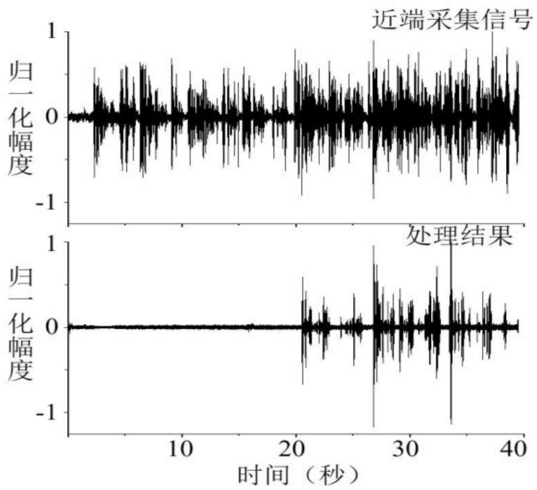
3.3.2　实验波形图

… f 400 F 1　'　Œ j PEÃ ò63　'　ÈG÷Lö \ `B$B　ê　' È ² .　　3.4 p/j Ä　TÖ { NþG÷Lö,´F 1　' ¼　4*6 >　' È ² .　　3.5 p/j Ä




. 3.4　F 1 ò63　' ¼ \ `　'

Fig. 3.4　Far-end Reference and Local Signal




. 3.5　F 1 G÷Lö　' ¼ 4*65 Ì

Fig. 3.5　Near-end Collected and Processed Signal

FJE÷ . 3.4 ¼ . 3.5　. È　…Aâ õ å　ëL” ¸ ¢ ð È üAâ õ å * \　1F 1 B$B êB N# = a-O Ä

### 3. 3. 3 ERLE 和 SER 测试

ò63 ITU-T *AÞ G.168 ],´ ý 4 •6G Î j (Echo Return Loss Enhancement, ERLE) È Ê y " (Signal Echo Ratio, SER) Ä \8²#{B ¶ = < š" õ å ; 3 ] = <!• K¯,´ NLMS 1Ç# ¼iF 1Ç# …Aâ ‘ & ;,´ ERLE ¼ üAâ ‘ & ;,´ SER Ä

wAîF 1 G÷Lö ' j $d(n)$ È4ß ð \ `B$B ê ' j $s(n)$ È 4*65 Ì j $e(n)$ Ä …Aâ & ERLE œ ? j

$$\mathrm{ERLE} = 10\log_{10}\frac{E[d^2(n)]}{E[e^2(n)]} \tag{3.36}$$

üAâ & SER œ ? j

$$\mathrm{SER} = 10\log_{10}\frac{E[s^2(n)]}{E[(s(n)-e(n))^2]} \tag{3.37}$$

6 [#{B NLMS 1Ç# Gü $\mu$ 0.1 Ã0.6 ¼ 1 ‘ & ¼ iF 1Ç# F >| )" ÈP¼ ž ² . p/j Ä

>˜ 3. 1 …Aâ ‘ & ; 41Ç# ERLE

Tab.3.1 ERLE of All Algorithm on single talking

| 1Ç# | EÃ • š" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5dB | 10dB | 15dB | 20dB |
| $\mu = 0.1$ | 10.97 | 17.94 | 25.11 | 30.56 |
| $\mu = 1$ | 10.28 | 16.85 | 24.96 | 29.87 |
| $\mu = 0.6$ | 11.18 | 18.16 | 26.24 | 31.68 |
| iF 1Ç# | 11.44 | 18.69 | 26.80 | 32.83 |

>˜ 3. 2 üAâ ‘ & ; 41Ç# SER

Tab.3.2 SER of All Algorithm on double talking

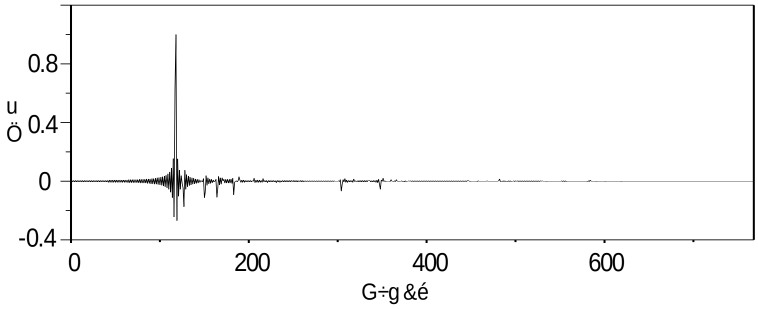
| 1Ç# | EÃ • š" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 5dB | 10dB | 15dB | 20dB |
| $\mu = 0.1$ | 1.03 | 2.74 | 6.59 | 8.50 |
| $\mu = 1$ | 1.01 | 2.72 | 6.55 | 8.35 |
| $\mu = 0.6$ | 1.05 | 2.81 | 6.74 | 8.90 |
| iF 1Ç# | 3.70 | 7.66 | 11.92 | 14.71 |

FJE÷ 6 À>˜ 3.1 ¼>˜ 3.2 . È\ ·1Ç# Aê …Aâ ‘ & ;F _ üAâ ‘ &G-7-9ç Ç8Ÿ - ,´ x Ì Ä NLMS 1Ç# X $\alpha$ 0.6 &7-9ç Ç =KI,´ x Ì ÄX ~ š" & 4 Z1Ç# ¤ $f$ È

Q š" & È iF 1Ç# X …Aâ õ å x Ì w = > n È X üAâ ‘ & ;" ¦ 1Ç# x Ì w > n Ä

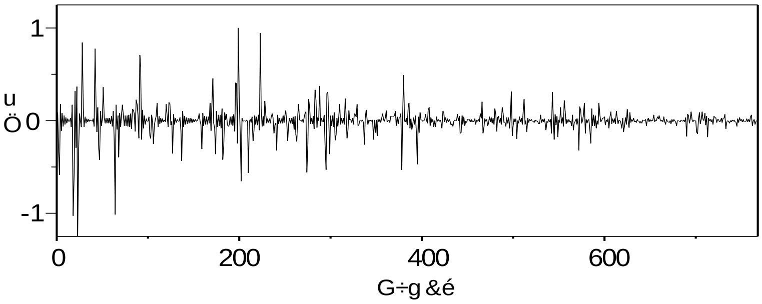
3. 3. 4 归一化失配率

\8²G÷+X /-O ÎP¼ ÈF9 T/ý = <,´ D ´ Œ j Z. 3+5 È … } â + ý Ä ² . p /j ÈK¯ Ö F9 j 768 È /-O ÎP¼ & 8 F2 Ä% # ˜K¯ Ö • _ 768 ÄF & j 6 ‡NÁ 8 F2 Ä % # 1Ç# ]Aî5ž ‡ $M_L = 12$ È6< D!ÿ ‡K¯ ÖF9 j 64 È<-'f )EÃ • 'F >| ¶ à ‡ ‡ b6„ 4*6 È v _ W0Ç 0+ Ø & ‡ j … } È p B % # ˜ 1y x K¯ Ö j 768 ÄF g a )" 41Ç# !ÿ!QAÑ1Ç Ç ` sGý3+ D -O Î oL$ â + ý Ä Ä08\ § 9 >˜ W,´ oL$ â + ý Ä ² . 3.6 p/j ÈF _ ~$' ý &K¯ F ]1y0; Ö$' ý,´ oL$ â + ý Ä Ä . 3.7 _8¢ “ â + ý Ä È>˜/j ý 47-Gÿ p •" » ¸ W ÈF T/ý ý Ä - w+a Image Q » X MATLAB 2010 ;+O @ Ä




. 3. 6 00+¿ â + ý Ä

Fig. 3.6 Sparse Impulse Response



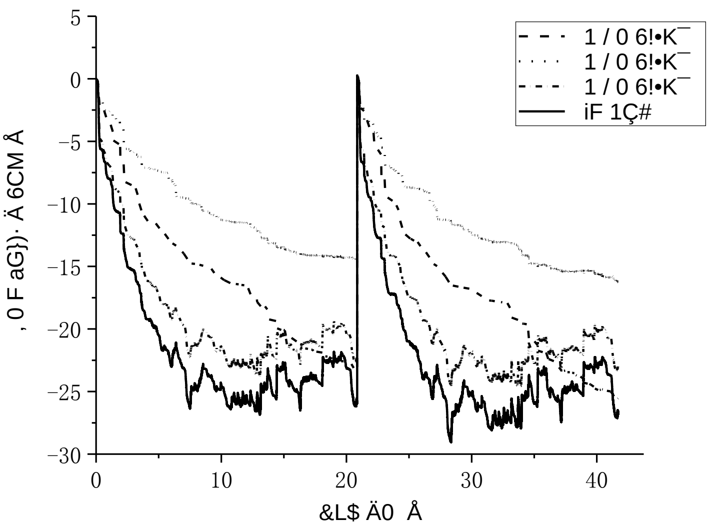

. 3. 7 8¢ “ â + ý Ä

Fig. 3.7 Dispersive Impulse Response

j ¶>‘Gÿ1Ç# ,´F-DZ7- Ë È 6 [AÑ1Ç 41Ç# X p 9 & k,´ , 0 F aG})· (Normalized Misalignment, NM)È wAî D ´ â + ý Ä,´-O Î l ¼#{Gÿ l 6 [ _ $\boldsymbol{h}(n)$ ¼$\hat{\boldsymbol{h}}(n)$ ÈFÓ x ò63 ITU-T G.168 •AÞ Ê y NM >˜Eî ? j

$$\mathrm{NM} = 10\log_{10} E\left(\frac{\left\|\boldsymbol{h}(n) - \hat{\boldsymbol{h}}(n)\right\|^2}{\left\|\boldsymbol{h}(n)\right\|^2}\right) \tag{3.38}$$

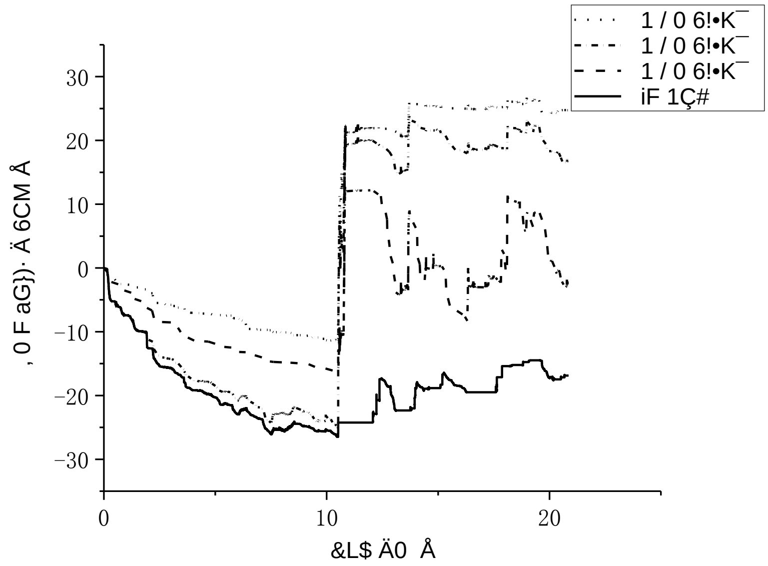
/-O5 ÌFJE÷5, 8 £ w 50 !QB P¼9ç Ç È Õ ; •F-DZ P5 NMLS ¼\ · iF 1Ç# ,´ , 0 F aG})· È P5 é# FJE÷F9 = < ò Ç ` 9/ý = <5 Ì È #{B ’ D ´ õ å & F9+X,´ â + ý Ä ² . 3.6 ¼3.7 p/j Ä1\ 04ô ÎP¼Aî Ê X 200 & ’ D ´ È p 9 & k,´ , 0 F aG})· "4ï ² . 3.8 p/j È 1\ ¼4ô ÎP¼Aî Ê X 100 & Ð • \ `B$B ê N# È £ +O üAâ õ å Ä …Aâ ¼ üAâ ÎP¼F-DZ 0 F aG})· "4ï ² . 3.9 p/j Ä




. 3.8 D ´ ’ aG})·" E³

Fig. 3.8 Normalized Misalignment Comparison of Different Echo Paths

F-DZ , 0 F aG})· > n,´-; * 4 Z1Ç# X = < & k,´ f ‹ õ å È• -; * ƒ D ´0± & È ½!Q ` f ‹(æ 1 pM0?±,´ &L$ ú0c Ê W Ä þ . 3.8 ] -; * i F 1Ç# X ¤ Z#{B &L$!åG- _ f ‹FO Ö 0 ,´ È ¦ D0c Ê W •E³ j È ƒ D ´ +O0± & È , 0 F aG})· ½!QL} ` -15dB õM0?±1-20 È _#{B ,´ p 9 é# ]+X & 0 A,´ Ä ?ò Aî Ê = < ò & P 5 NLMS 1Ç# <-'f •7- OF@!•Eî ` f ‹,´ x Ì È v _+X &G-" E³ K¯ È ¦ D þ f ‹C» ï : •-; ¦ ³1Ç# "Ñ 9 iF 1Ç# ,´0c Ê WQ Ä




. 3. 9 …Aâ ¼ üAâ, 0 F aG})·" E³

Fig. 3.9 Normalized Misalignment Comparison of Single-talking and Double-talking

FJE÷ :F ÎP¼ . Ç * iF 1Ç# X …Aâ ¼ üAâ ‘ & ; " = < ò ,´ P5 NLMS 1Ç # , 0 F aG})· ? È T ¦ _ ƒ üAâ *)à & È P5 NLMS 1Ç# ¸Lî f ‹ È6< iF 1Ç# ý 7- O f ‹ È • a _B$ iF 1Ç# 7- O X üAâ *)à & ý 9ç Ç8Ÿ -,´ #¸L”7- Ë Ä

# 4 改进 LCMV 结合 WPF 波束成形算法

## 4.1 波束成形算法

### 4.1.1 波束成形最优权重矢量

Y+X JD FJFƒG÷Lö ` JD ' ÈFJE÷ ) = < ',´ Ð s"r ¼ È¯Le G# • k+ 7 A O K é A È ñ+ ¼M&L§ }5ž 7 A ¢ é A È þ6< ¯ O K é A Ç ` Î j È ¯ ¢ é A Ç ` Á f ÈF a _# • @ ' ° _ Ä w ÊEÃ * ' AGÿ j $\boldsymbol{x}(n)$ È Ð s AGÿ j $\boldsymbol{h}_{opt}(n)$ È £

$$\boldsymbol{y}(n) = \boldsymbol{h}_{opt}^{\mathrm{H}}(n)\boldsymbol{x}(n) \tag{4.1}$$

² Ì+X $\boldsymbol{R}_{xx}$ >˜/jEÃ • ',´8 -( £. Le È I# • @ ',´EÃ * £ w Ï)· >˜/j j

$$P = \boldsymbol{h}_{opt}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{xx}\boldsymbol{h}_{opt} \tag{4.2}$$

Ê y h j $\lambda$ È O K é A. Gÿ j $\boldsymbol{a}(\theta_0)$ È Y+X H F ¼4ï W . Aö "r Ç 0 H sGý. Gÿ >˜Eî ?

$$\boldsymbol{h}_{opt} = \lambda\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0) \tag{4.3}$$

F g a7- AñLe G!" h Õ f $\theta_0$ é A,´B N# ' È Á f ¦ é A,´ ' Ä

6 ? (4.3) Ç `,´ sGý. Gÿ V •4Ö • ' &"r Ç h j

$$\lambda = \frac{1}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_0)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0)} \tag{4.4}$$

6 ? (4.4) V • ? (4.3) Ç

$$\boldsymbol{h}_{opt} = \frac{\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0)}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_0)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0)} \tag{4.5}$$

### 4.1.2 MVDR 算法

MVDR 1Ç# k?± M # _ Añ O K é A $\theta_0$ ' a-O È ¯EÃ * k Ï)· 0 ? ÈF g a 7- Añ š ¼ ¢ Ç ` Á f Ä Ê y sGý. Gÿ j $\boldsymbol{w}(n)$ È O K é A. Gÿ j $\boldsymbol{a}(\theta_0)$ ÈEÃ • ' ,´8 -( £. Le _ $\boldsymbol{R}_{xx}$ È IB 1Ç# ' - j

$$\begin{cases} \min\limits_{\mathrm{w}} \ \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{xx}\boldsymbol{w} \\ \text{s.t} \ \ \boldsymbol{w}\boldsymbol{a}(\theta_0) = 1 \end{cases} \tag{4.6}$$

E+X$\lambda$ F 0 h È ò63 G I G ˆ €# Ê y

$$J = \frac{1}{2}\boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{xx}\boldsymbol{w} + \lambda[1 - \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{a}(\theta_0)] \tag{4.7}$$

"r : ? ß Ö È ¦ , 1y ¾ 0 Ç

$$\frac{\partial J}{\partial \boldsymbol{w}} = \boldsymbol{R}_{xx}\boldsymbol{w} - \lambda \boldsymbol{a}(\theta_0) = 0 \tag{4.8}$$

"r@ Ç sGý. Gÿ>˜Eî ?

$$\boldsymbol{w} = \lambda \boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0) \tag{4.9}$$

6 ? (4.9) • ? (4.6),´4Ö • ‘ & ] "r * h j

$$\lambda = \frac{1}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_0)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0)} \tag{4.10}$$

6 $\lambda$ V • ? (4.9) Ç 04ø Ð s AGÿ j

$$\boldsymbol{w}_{MVDR} = \frac{\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0)}{\boldsymbol{a}^{\mathrm{H}}(\theta_0)\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{a}(\theta_0)} \tag{4.11}$$

### 4.1.3 LCMV 算法

}M’ `E÷ È8 F2 Ä# • @ ’1Ç# G÷+XF 1Ç# • $ à sGý,´ é ? ÈF 7- O Añ3+ 5 EÃ *E³Q ¢ š" Ä v _Fw ` O K •# é A `AÑ =2î.ž õ å & ÈB 1Ç# W7- 6 U — ; L} È j ¶ iF !” 4 È Î Ð4Ö • ‘ & ÈF a _ LCMV # • @ ’1Ç# Ä

LCMV 1Ç# _ X MVDR 1Ç# *.p : Î Ð4ï W4Ö • ‘ &6< •,´ È ¦ 9ç Ç $ 9 x ,´ š ¼ ¢ Á f x Ì È ³ _ 0/ý7- O ) 'F >| Î & 4*6,´1Ç# ÄB 1Ç# k?± M #F _FJE÷ = ÝF $ à% # ˜ Ð s3+ È¯ Ç3+5 ) O K é A 'NÁ ý Añ = È < & ¯ EÃ * ' ] š ¼ ¢ ,´ Ï)· 0 ? Ä

LCMV # • @ ’1Ç# , Ž ¾ é A4Ö •# È Ê y $\boldsymbol{a}_s$ _ ' é A. Gÿ È œ ? ² ;

$$\begin{cases} \min\limits_{\mathrm{w}} \ \boldsymbol{w}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{xx}\boldsymbol{w} \\ \text{s.t.} \ \ \boldsymbol{C}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{w} = \boldsymbol{f}_k \end{cases} \tag{4.12}$$

: ? ] $\boldsymbol{C}_k = [\boldsymbol{a}(\theta_0), \boldsymbol{a}(\theta_1), \ldots, \boldsymbol{a}(\theta_{k-1})]$ È ¦5$ Ö _ $M \times k$ È $k$ _4Ö • ‘ &,´ Z Ä

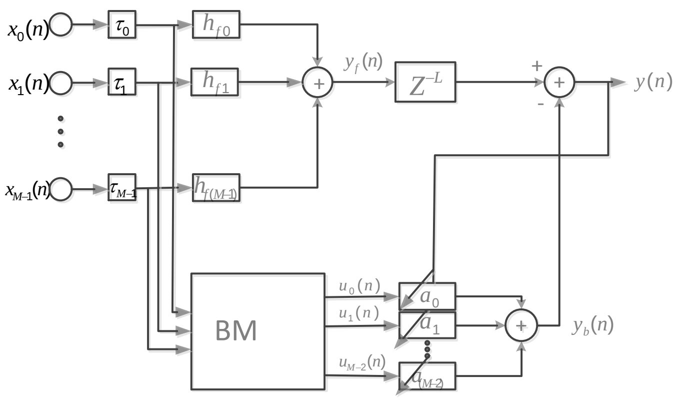
"r@ ? (4.12) Ç

$$\boldsymbol{w}_{LCMV} = \boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{C}_k(\boldsymbol{C}_k^{\mathrm{H}}\boldsymbol{R}_{xx}^{-1}\boldsymbol{C}_k)^{-1} \tag{4.13}$$

EÃ • 'FJE÷Le G &F >• ¯ 4*6 > ÈF & )!ÿ Z – P O ˜6<@0 ³ ,´# ' _-( < ,´ È¤ $f$,´ 4*61y x ¾4ÿE÷ 0 ZLf j $K$,´ 9L€K¯% # ˜ Èÿ Z% # ˜ ÎLu : a _ $M$ Lf &F í d3+ ÄFÓ xF Ë% # ˜3+ % Cã $K$ Z4Ö • ‘ & È Î Ð4Ö • ‘ & _ (ª(¢8 +a Ö j ',´ ÈF g 7- JL} ~1Ç# #¸L” š ¼ ¢ ,´ W7- ÈB 1Ç# ,´AÑ1ÇGÿ _+a. Le"rF6 ã Ê,´ ÈAÑ1ÇGÿ j $O(M^3)$ Ä

### 4.1.4 GSC 结构

X P5 ,´# • @ ’ *.p : E •Lk Ž. Le (Block Matrix, BM) a ´ @ GSC5 ´ ¶ È ² . p/j ÈD X ¦ >,´ _8 F2 Ä š å#¸ Q ‡ (Adaptive Noise Canceller, ANC) ÄGSC5 ´ 68 F2 Ä# • @ ’ ] V4Ö • H FL NÈEœ ’ @ 4Ö • H FL NÈ ÈW ƒ : 6 j T ‘4ï D È kFJFƒ j P5 &F "r ¼E÷0; È ŸFJFƒCOCS8 F2 ÄB3¤E÷0; Ä X8 F2 ÄG 6 Ð •Lk Ž . Le 64Ö • ‘ & þ3+5 ] 6/ë * • È £ ÿ A O K '"ôMb `Eµ ÙFJFƒ,´ @ 6 È * Ê # • @ ’,´ œ ? ò'— œ ? (4.1) Ä




. 4.1 GSC5 ´

Fig. 4.1 The Structure of GSC

. 4.1 ] ANC _0 Z 9L€K¯% # ˜ È BM Q ‡ … s _ j ¶% L” O K é A :,´ ' È Añ ¦EÃ * õ õ 9 ¢ ¼ š Ä P5 # • @ ’ _&L$ &F >• ¯ È6< GSC 5 ´ E •,´ BM … s!ÿ G s3P { ¼ j 0 ÈF a7- AñEÃ * = 5 [ O K é A ' @ 6 È w Ê4ÿ BM > ' @ $\boldsymbol{u}(n)$

$$\boldsymbol{u}(n)=\boldsymbol{h}_b^{\mathrm{T}}x(n) \tag{4.14}$$

Ê y $\boldsymbol{b}_m^{\mathrm{T}}$ j $\boldsymbol{h}_b^{\mathrm{T}}$,´ 1\ $m$ >| AGÿ È $\boldsymbol{I}_1$ _0 Z G AGÿ È D ˜G s3P j 1 ÈFÓ x ¦ Ä% Cã ² ; ‘ &

$$\boldsymbol{b}_m^{\mathrm{T}}\boldsymbol{I}_1=0 \tag{4.15}$$

< g È Ê y kFJFƒ% # ˜ sGý. Gÿ j Ä $\boldsymbol{h}_f(n)$ È ¦ ÄB % Cã ; ?

$$\boldsymbol{h}_f(n)\boldsymbol{I}_1=1 \tag{4.16}$$

Ê y AGÿGü s3P Z _ $M$ ÈEµ ÙFJFƒ% # ˜,´3+ AGÿ j $\boldsymbol{a}_{BM}$ È+a ¾$\boldsymbol{b}_m^{\mathrm{T}}$ _-( Â) 0û,´ È p $\boldsymbol{u}(n)$ 0 J+a $M-1$ Z4ï W) 0û s3P ´ @ È { > ' @ ² ; ’ ?

$$y_b(n) = \boldsymbol{a}_{BM}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{u}(n) \tag{4.17}$$

w Ê kFJF*ƒ*,´EÃ * j $y_f(n)$ È 04ø3+5 EÃ * F g>˜/j

$$y(n) = y_f(n) - y_b(n) \tag{4.18}$$

: ? ],´ $y_b(n)$ õ õ 5 [ ¢ ¼ š @ 6 È = 5 [ O K é A,´ ' ÈF g3+5 ,´EÃ * _ 1V 8 x },´4Ö •,´ È £ O K é A ' 1 = Ã Á f ¦ ³ é A ' ÈEÃ *5 Ì ] < & 5 [ kFJF*ƒ* ¼Eµ ÙFJF*ƒ* ) ',´ 4*6 ÄB GSC5 ´M0?±B3 ¤Eµ ÙFJF*ƒ*% # 3+ AGÿ $\boldsymbol{a}_{BM}$ ¯ Ç3+5 EÃ * ] š ,´ Ï)· 0 ? È { >,´ µ é û4ý,´ LCMV é# • 9F g,´?±"r Ä

Ê y $\mu_g$ j 0 h È $k$ 93 $ þ 0 ` $M-1$ ÈANC Q ‡ ]% # ˜3+ F œ ? ² ;

$$\boldsymbol{a}_k(n+1) = \boldsymbol{a}_k(n) + \mu_g y(n) \boldsymbol{u}_k(n) \tag{4.19}$$

k5 Ç È œ ? (4.16) Ã(4.17) ¼ œ ?(4.19) ´ @ ¶ GSC5 ´ È Î)à ¶ å#¸ ñ+ ,´# • @ ’,´ Ï7- ÄB 5 ´ k?± ÍC†Eµ ÙFJF*ƒ*,´ BM ¼ P5 # • @ ’,´ &F "r ¼ ÈEµ ÙFJF*ƒ* ,´ BM … sLb!’ O K "'ôMb ` $y_b(n)$ È Añ ¶Eµ ÙFJF*ƒ*,´EÃ * õ 5 [ ¢ ¼ š @ 6 È Î)à ¯ y ñ+ -(#¸ ?8 F2 Ä# • @ ’1Ç# Ä GSC5 ´ ) BM ¼ kFJF*ƒ*% # sGý. Gÿ 9 0 Ê?±"r È ò'— :F œ ? . Ä!” F È *ƒ* BM Q ‡ ] $\boldsymbol{h}_b(n)$ ,´!ÿ Z G AGÿ _!“ Ô £3+ & È GSC a @ ¶ LCMV 1Ç# Ä ² Ì = % Cã :F ‘ & È ?± Í 4 ¾ £0c(æ 1 ; ÈB 5 ´ Í 7- Î)àL} š,´ x Ì È õ õ _8 F2 ÄE˜F) 9 p i Ä üFJF*ƒ* GSC 5 ´G÷+X TFJF*ƒ* & & )U€-( ÿ,´1° … é# ÈF g Š J ,8$ BM EÃ *5 Ì =*6 # È(© [ _ X ' > ¢ •# é A ÕF ,´ õ å ; È ¢ ¼ š • J>Û% L” ÈF g a UGý ¡ ý ¶ ¯ y ñ+ -(#¸,´ W7- Ä ÎP¼E÷0; ] A )à È GSC5 ´G} 8 * Ê# • @ ’,´B N# Î j x Ì = > n È6< DLk Ž. Le,´F9 ¸Gý?± Èh?ô,´ F9 1 ¼1 ,´ Š# JFP @ 0 Ê,´"ôMb ÈB é# F M0F 0!•.D0¦ Ä

## 4.2 基于 LCMV 和后置滤波的波束成形算法

### 4.2.1 改进的自适应波束成形

OÆ x X. & µGü & ’ +X ;M’,´ Q » • ÿF $À 6/ë ¼B N# Î j,´L NÈ Èw AÎ $l$ >˜ W ' È $k$ >˜NÁ)·3R E ÈwAÎ)à X 9 $M$ ZB$B ê,´B N#>Û $N$ ZTÖ {NþG÷Lö ` È < &+X $X_{i,m}(l,k)$ >˜/j $À $m$ >ÛTÖ {NþG÷Lö `,´B N# ' È $V_i(l,k)$ >˜/jTÖ {Nþ $i$ G÷Lö `,´ 6ü Ÿ š ÈFÓ x TÖ {NþG÷Lö,´ ' j

$$Y_i(l,k) = \sum_{m=1}^{M} X_{i,m}(l,k) + V_i(l,k), \quad i = 1,2,\ldots,N \tag{4.20}$$

Ê y £0c(æ 1 ;1\ $m$ Z ê `1\ $i$ ZTÖ {Nþ,´ j PFB - j $G_{i,m}(l,k)$ È < & wAî $À ' j $S_m(l,k)$ ÈFÓ xTÖ {NþLe G Õ f,´ '. Gÿ j

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{y}(l,k) &= [Y_1(l,k)\ Y_2(l,k) \ldots Y_N(l,k)]^{\mathrm{T}} \\
&= \sum_{m=1}^{M} \boldsymbol{x}_m(l,k) + \boldsymbol{v}(l,k) \\
&= \sum_{m=1}^{M} \boldsymbol{g}_m(k) S_m(l,k) + \boldsymbol{v}(l,k) \\
&= \boldsymbol{G}(k)\boldsymbol{s}(l,k) + \boldsymbol{v}(l,k)
\end{aligned} \tag{4.21}
$$

? (4.21)] Gÿ Ê y ² ; È

$$\boldsymbol{x}_m(l,k) = [X_{1,m}(l,k)\ X_{2,m}(l,k) \ldots X_{N,m}(l,k)]^{\mathrm{T}} \tag{4.22}$$

$$\boldsymbol{v}(l,k) = [V_1(l,k)\ V_2(l,k) \ldots V_N(l,k)]^{\mathrm{T}} \tag{4.23}$$

$$\boldsymbol{g}_m(k) = [G_{1,m}(k)\ G_{2,m}(k) \ldots G_{N,m}(k)]^{\mathrm{T}} \tag{4.24}$$

$$\boldsymbol{G}(k) = [\boldsymbol{g}_1(k)\ \boldsymbol{g}_2(k) \ldots \boldsymbol{g}_M(k)] \tag{4.25}$$

$$\boldsymbol{s}(l,k) = [S_1(l,k)\ S_2(l,k) \ldots S_M(l,k)]^{\mathrm{T}} \tag{4.26}$$

Y+X ? (2.3) ¼ ? (2.4) È% # >B N# ' >˜/j j

$$s_F(l,k) = [G_{1,1}(k)S_1(l,k)\ G_{1,2}(k)S_2(l,k) \ldots G_{1,M}(k)S_M(l,k)] \tag{4.27}$$

Y+X H F,´ MMSE ö l `AÑ% # >B N# ' $s_F(l,k)$ È j ¶ ï ¾ Ø , Gý ÉLe G Õ f ' Q »

$$
\begin{aligned}
\boldsymbol{y} &= \sum_{m=1}^{M} \frac{\boldsymbol{g}_m}{G_{1,m}} G_{1,m} S_m + \boldsymbol{v} \\
&= \sum_{m=1}^{M} \tilde{\boldsymbol{g}}_m S_{F,m} + \boldsymbol{v} \\
&= \tilde{\boldsymbol{G}} \boldsymbol{s}_F + \boldsymbol{v}
\end{aligned} \tag{4.28}
$$

;M' û4ý $\tilde{\boldsymbol{G}}$ ,´ AÑ1Ç# È wAî)à X 9 0 Z ê õ ' ; È : ? Ç *TÖ {Nþ 1 ¼TÖ {Nþ $n$ G÷Lö `,´ '>˜Eî ?

$$\boldsymbol{y}_{1,1} = G_{1,1} S_1 + V_1 \tag{4.29}$$

$$\boldsymbol{y}_{n,1} = G_{n,1} S_1 + V_n \tag{4.30}$$

6„0û :F T ?#¸ ë $S_1$ Ç `

$$\begin{aligned} \boldsymbol{y}_n &= G_{n,1}\frac{\boldsymbol{y}_1 - V_1}{G_{1,1}} + V_n \\ &= \frac{G_{n,1}}{G_{1,1}}\boldsymbol{y}_1 + V_n - \frac{G_{n,1}}{G_{1,1}}V_1 \\ &= \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}\boldsymbol{y}_1 + V_n - \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}V_1 \end{aligned} \tag{4.31}$$

Ê y $U_n = V_n - \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}V_1$ ÈFÓ x : ? @

$$\boldsymbol{y}_n = \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}\boldsymbol{y}_1 + U_n \tag{4.32}$$

1y ? TEé < & ¼ $\boldsymbol{y}_1$ Â-( £ Ç

$$\boldsymbol{\Phi}_{y_n y_1} = \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}\boldsymbol{\Phi}_{y_1 y_1} + \boldsymbol{\Phi}_{U_n y_1} \tag{4.33}$$

Ê y $\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_n y_1}$ Ã $\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_1 y_1}$ ¼ $\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{U_n y_1}$ 6 [ j $\boldsymbol{\Phi}_{y_n y_1}$ Ã $\boldsymbol{\Phi}_{y_1 y_1}$ ¼ $\boldsymbol{\Phi}_{U_n y_1}$ ,´ `AÑ l È +a ¾ $U_n$ =7--$ Õ9ç Ç È Ê y ³ ¼ ) Ä `AÑ l {L$,´B j $\varepsilon_n$ È wAîB $\varepsilon_n$ % Cã0 w lQ ß 6 3 È ? (4.33) F 1° j

$$\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_n y_1} = \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_1 y_1} + \boldsymbol{\Phi}_{U_n y_1} + \varepsilon_n \tag{4.34}$$

F9 F 5 ,´ $L$ W È FJE÷ ;M’,´ œ ? Y+X 0 ? ¼ ˆ# "r@ $\widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1}$

$$\begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\Phi}}^{(1)}_{y_n y_1} \\ \hat{\boldsymbol{\Phi}}^{(2)}_{y_n y_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\boldsymbol{\Phi}}^{(L)}_{y_n y_1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hat{\boldsymbol{\Phi}}^{(1)}_{y_1 y_1} \\ \hat{\boldsymbol{\Phi}}^{(2)}_{y_1 y_1} \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \hat{\boldsymbol{\Phi}}^{(L)}_{y_1 y_1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1} \\ \boldsymbol{\Phi}_{U_n y_1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \varepsilon^{(1)}_n \\ \varepsilon^{(2)}_n \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \varepsilon^{(L)}_n \end{bmatrix} \tag{4.35}$$

04ø Ç ` ; ?

$$\widetilde{\boldsymbol{G}}_{n,1} = \frac{\overline{\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_1 y_1}\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_n y_1}} - \overline{\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_1 y_1}} \cdot \overline{\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_n y_1}}}{\overline{\boldsymbol{\Phi}^2_{y_1 y_1}} - \overline{\hat{\boldsymbol{\Phi}}_{y_1 y_1}}^2} \tag{4.36}$$

? (4.36) ]!ÿ 0N© : é,´ Z4ï>˜/jF 5 $L$ W £ w È $L$ ,´ lD 'G÷ g)· ¼Gý 6 W 9 £ È \ · ÎP¼ & $L$ j 20 Ä wAî $\boldsymbol{s}_F$ ¼ $\boldsymbol{y}$ _ 0 w l =Q ßL¿ j Gÿ È Y+X MMSE ö l `AÑ $\boldsymbol{s}_F$ È Y+X H F é# Ç ² ; œ ?

$$\operatorname{argmin} E\{\|\hat{\boldsymbol{s}}_F(\boldsymbol{y}(l,k)) - \boldsymbol{s}_F(l,k)\|^2\} = E\{\boldsymbol{s}_F(l,k) \mid \boldsymbol{y}(l,k)\} \tag{4.37}$$

wAî $\boldsymbol{\Phi}_{s_F}$ _ $\boldsymbol{s}_F$ ,´ `AÑ l È l $\boldsymbol{s}_F$ Gý à … 0 @ ? (4.38) Ä

$$\begin{aligned}\hat{\boldsymbol{s}}_F &= E\{\boldsymbol{s}_F\boldsymbol{y}^{\mathrm{H}}\}\times E\{\boldsymbol{y}\boldsymbol{y}^{\mathrm{H}}\}^{-1}\boldsymbol{y}\\ &= \boldsymbol{\Phi}_{sF}\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\times[\widetilde{\boldsymbol{G}}\boldsymbol{\Phi}_{sF}\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}+\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}]^{-1}\boldsymbol{y}\\ &= (\boldsymbol{I}+\boldsymbol{\Phi}_{sF}\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}\widetilde{\boldsymbol{G}})^{-1}\boldsymbol{\Phi}_{sF}\times\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}^{-1}\boldsymbol{y}\end{aligned}\tag{4.38}$$

Y+X ?(2.5) , *

$$(\boldsymbol{I}+\boldsymbol{AB})^{-1}\boldsymbol{A}=\boldsymbol{A}(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{B}^{-1})^{-1}\boldsymbol{B}^{-1}\tag{4.39}$$

6 $\boldsymbol{A}=\boldsymbol{\Phi}_{sF}$ È $B=\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_v^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}}$ V • œ ?(4.38) Ç

$$\hat{\boldsymbol{s}}_F=\boldsymbol{\Phi}_{sF}(\boldsymbol{\Phi}_{sF}+(\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}})^{-1})^{-1}\times(\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}})^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_{\boldsymbol{v}}^{-1}\boldsymbol{y}\tag{4.40}$$

: ? #Eé,´ } zG 6 _ LCMV Ð s3+ È ³ _ 0 Z $N\times M$ ,´. Le. Gÿ È > zG 6 _ J FJFƒ5$4ã% # ˜,´3+ È ³ _ 0 Z $M\times M$ ,´. Le. Gÿ Ä ƒ š Ba ö Ö. Le $\boldsymbol{\Phi}_v$ F6 & È : ? } 9 x È ƒB$B ê - A ¾TÖ {Nþ Gÿ & È j PFB - % Cã( Â) 0û,´ ' & Ä * ¾ LCMV ,´# • @ ' œ ? ² ;

$$\begin{cases}\boldsymbol{H}_{LCMV}=\operatorname{argmin}\operatorname{tr}[\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_v\boldsymbol{H}]\\ \text{s.t. }\boldsymbol{H}^{\mathrm{H}}\widetilde{\boldsymbol{G}}=\boldsymbol{I}\end{cases}\tag{4.41}$$

FJE÷"r@ Ç

$$\boldsymbol{H}_{LCMV}=\boldsymbol{\Phi}_v^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}}(\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_v^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}})^{-1}\boldsymbol{I}\tag{4.42}$$

LCMV Ð s. Gÿ _ 0 Z $N\times M$ ,´. Le È 6 : ? ¼G÷Lö,´Le G 'NÁ ) Ä-( ˆ Ç $M$ D 6/ë >,´B N# ' Ä

4ÿE÷LCMV 4*6 >!»+‰ š Ï)· ² ;

$$\begin{aligned}\boldsymbol{\Phi}_{v,RE}&=E\{\boldsymbol{v}_{RE}\boldsymbol{v}_{RE}^{\mathrm{H}}\}\\ &=\boldsymbol{H}_{LCMV}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_v\boldsymbol{H}_{LCMV}\\ &=(\widetilde{\boldsymbol{G}}^{\mathrm{H}}\boldsymbol{\Phi}_v^{-1}\widetilde{\boldsymbol{G}})^{-1}\end{aligned}\tag{4.43}$$

wAî!ÿ ZB$B ê X £0c(æ 1 ; _-( Â) 0û,´ ÈY+X iF ,´ é A ã Ê# • `AÑ $\boldsymbol{\Phi}_{s_F}$ [58] È œ ? ² ;

$$\hat{\phi}_{S_F,n}=\beta_r\left|s_{LCMV+WPF,n}(l-1)\right|^2+(1-\beta_r)\max\{\left|s_{LCMV,n}(l)\right|^2-\phi_{v,RE,n},0\}\tag{4.44}$$

: ? ] $\beta_r$ _ 0 Z h ÈF Gü 0.95È$l$ >˜ W ' Ä i ž ?(4.40) Ç JB$B ê5$4ã% # ˜ 3+ j

$$\boldsymbol{H}_{WPF}=\boldsymbol{\Phi}_{sF}(\boldsymbol{\Phi}_{sF}+\boldsymbol{\Phi}_{v,RE})^{-1}\tag{4.45}$$

X ÎP¼E÷0; J )à L} š x Ì ¸ - È v _ J )- 7B N#FP @ a-O È j!" iF >5ž5$4ã % # ˜3+ œ ? j

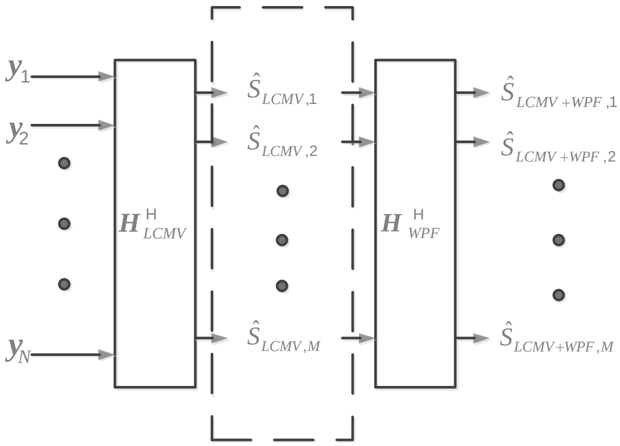
$$\boldsymbol{H}_{WPF} = (1-\beta_b)\boldsymbol{\Phi}_{sF}(\boldsymbol{\Phi}_{sF} + \boldsymbol{\Phi}_{v,RE})^{-1} + \beta_b \boldsymbol{I} \tag{4.46}$$

Ê y LCMV 4*6 > O K ' ¼6ü Ÿ š Ï)· ,´" l j $r_n$ È : ? ] $\beta_b$ _ > š" 9 £ ,´ Ð s3+ È +X ; ?>˜/j

$$\beta_b = 1 - e^{-k_c r_n} \tag{4.47}$$

F Gü3+ $k_c$ 4ÿP¼ l j 0.9 Ä!” F È `AÑ,´ š (w!åF9 • q 6Gý?± È ² Ì # m 7- J ,´ ëL” ¢ È lF9 ,´ š (w!åM0?± 5 [ 0 Ë …) ,´ ¢ @ 6 ÈF g ,´- 7B N#!» +‰,´ ¢ @ 6 J" E³ A Ä

Y+XMMSE ö l 6B N# 6/ë úL} š1Ç# 6 j T Z!•PÔ È ² . 4.2 p/j Ä




. 4.2 LCMV 5 85$4ã% # 1Ç# 5 ´ .

Fig. 4.2 The Structure of LCMV and WPF

### 4.2.2 语音重叠帧检测算法

B 1Ç# M0?±B$B ê,´ xP¼ Ÿ È a _ õ ˆ 4 ê) 9,´ $M$ ZB N#!å Ä\ ·.D0¦ ¶ 0/ý Y+X m)ËFJ% # ˜ € VNÁ B3 f (Gammatone Subband Frequency Modulation, GSFM) ½ L} l ,´ é# • j 6Gý B N# W(w!å ¼ …B$B ê(w!å Ä

OÆ1° … 6 À 0 ;!“ VB3 f ¼NÁBa(© ± Ä!“ V '4ÿE÷NÁ)·B3 f > ×+O $ JNÁ)· 6 Gÿ,´ ' Ä B3 f ',´ u Ö ¼NÁ)· @ 6 ¡ < ¡ ý "B3 ',´ NÁ)· @ 6 ÈwAîE-# NÁ)· j $f_c$ ÈB3 f 'NÁ)· j $f_m$ ÈB3NÁ 7 j $\beta_c$ ÈE-# ' _ u j $A_c$ È ¨ »,´B3NÁ ' $x_c(t)$ ² ;

$$x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \beta_c \sin(2\pi f_m t)) \tag{4.48}$$

E-# NÁ)· j ò63&é È1\ $n$ ZNÁ)· 6Gÿ,´ _ u $\beta_c$ _1\ $n$ LfCM Ž D3+ ÄGý W < & 5 [ T Z ' È j ¶ ï ¾ 6 À È AÔ jGý W8# A 5 [ T Z!“ V# È T ZNÁ)·,´NÁ)· B3 f ' ² ;

$$x_c(t) = A_c \cos(2\pi f_c t + \beta_{c1} \sin(2\pi f_1 t) + \beta_{c2} \sin(2\pi f_2 t)) \tag{4.49}$$

Y+X$n$ LfCM Ž D - … 0 > : ? j

$$x_c(t) = A_c \sum_n \sum_m J_n(\beta_1) J_m(\beta_2) \cos(2\pi(f_c + nf_1 + mf_2)t) \tag{4.50}$$

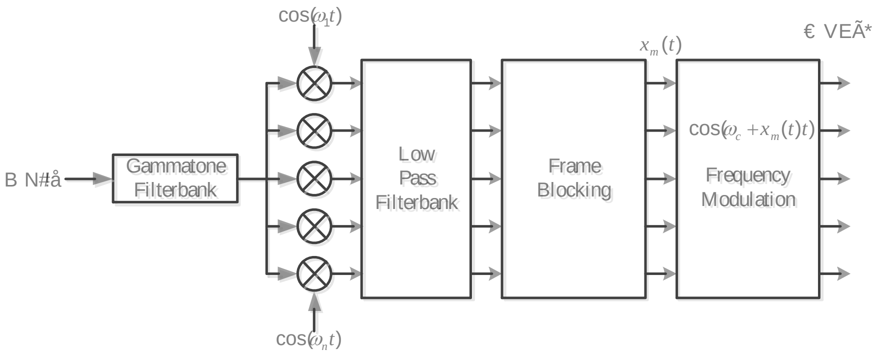
) ¾Gý W •B$ ÈLî&é _ j 6 -( £,´B@# @ 6 ¼ =-( £,´ MŽB@# NÁ)· 6GÄÿ 0 éM’ È ² ÌF T ZNÁ)· @ 6 _-( £,´ È : ? 1° F j

$$x_c(t) = A_c \sum_{n'} (K_{n'}) \cos(2\pi(f_c + n' f_1)t) \tag{4.51}$$

) ¾!ÿ 04ô $m$ ¼$n$ 9 ; ?

$$K_{n'} = J_n(\beta_1) J_m(\beta_2) \tag{4.52}$$

'f6< ƒNÁ VE³ í & È …N# WNÁ)·B3 f ' • § 9 ¶ J ZNÁ)· @ 6 È6< DD JN# W,´ [ ÿ ? È j ¶ $ - ` j 6F T2«M0?± 6 µ T [B N#FJE÷ 0 Z% # ˜4ô È þ6< ¯ ¦ 6@ ` J Z0´ V Ä XAÑ1Ç \?ù j Ÿ 6 ÀN¶ È ê h+X Gammatone% # ˜ • Q \?ù,´N´ 4*6 Ä \ ·.D0¦,´ é# x _+X Gammatone% # ˜ 6 µ ð#{ ' 6@ ` J Z € V È Õ-p G÷+XNÁ)·B3 f,´ é# ÄT [!ÿ ZB N#!å _ V jGý WM0?±M• J Z € V,´ T [5 Ì ¡ < ã Ê Ä ² Ì 0 Z €FJFƒ ' =7- O T [ * _ …N# WF _Gý W È FJE÷ ¦ FJFƒ,´5 ÌF >|>• ¯ ÈF g Š ¼ … 0 ã1† j Ÿ-(" § 9 $ -,´ 08$ W ¼0c Ê W Ä B 1Ç# (© ± ² ; . p/j



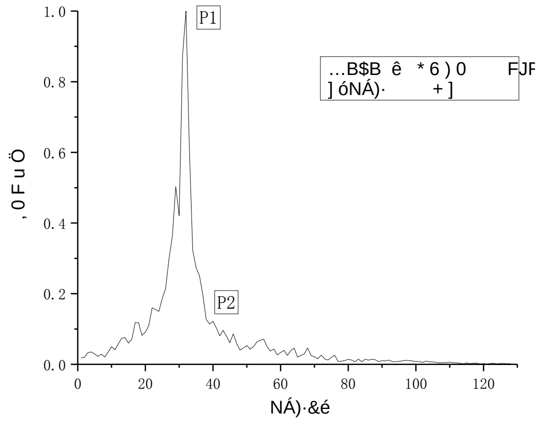

. 4.3 GSFM5 ´

Fig. 4.3 Structure of GSFM

OÆ x 6EÃ • 'FJE÷ 0 Z Gammatone% # ˜ 6 @ J Z € V ' È!ÿ Z € V ' ½ 4ÿE÷-( ¢@ B3NÁ6 Ba \0+ ` * V È ½4ÿE÷NÁ)·B3 fEÃ * Ä wAîEÃ *NÁBa ]1\ $i$ Z l j $P_i(t,f)$ ÈFÓ x% L} € ,´AÑ1Ç œ ? j

$$R_o(t,f)=\sum_{i=2}^{N}\frac{P_1(t,f)}{P_i(t,f)} \tag{4.53}$$

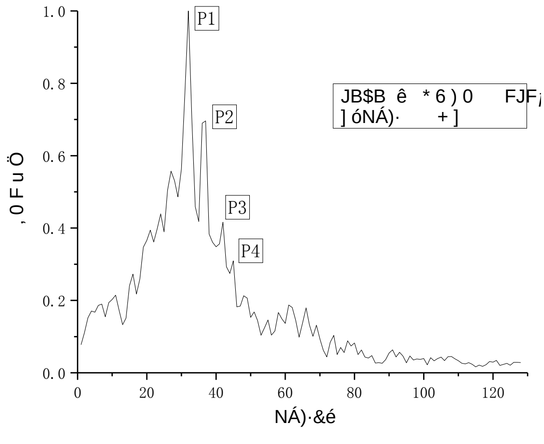
Y+X% L} € • T [B N# W ¼Gý WÈ% L} € FJE÷6Š2«1Ç# 9ç Ç È \ ·G÷+X4ÿP¼ l j 2 Ä ] óNÁ)· j 500Hz,´ …N# WGSFM ² . 4.4 p/j Ä




. 4.4 …B$B êGSFM NÁBa .

Fig. 4.4 Single Speaker GSFM Spectrogram

] óNÁ)· j 500Hz,´Gý W GSFM ² . 4.5 p/j Ä




. 4.5 JB$B ê GSFM NÁBa .

Fig. 4.5 Co-channel GSFM Spectrogram

### 4. 2. 3 说话人索引

Y+X VAD ¼Gý W ð#{ Ç ` …N#!åB N# È ² Ì?± Ä+X ` 0; N¶ F M0?± Î & $ àB$B ê xP¼ Ÿ ÈFJ hG- Y+X Q »F >|B$B ê3R E FAö [ È ® ` ) Ä!ÿ Z êB ê,´ …N#!å È v _ é# G-" E³ = r È ¸Lî Š ` Î & 4*6 ÈF 1ÇGÿ •" E³ W È \ ·.D0¦ ¶ 0/ý 1° …,´FJE÷(© ± ¼6Š2«,´ é# F >|B$B ê3R E Ä

1\ 0!• i ž …N#!å,´ •# é AF >| ,2« È Y+X * ¾-( } ',´ ¯ y Â-( £# (Phase Transform Generalized Cross Correlation PHAT-GCC) F >| TDOA `AÑ È wAîEÃ • ' & NÁ j $x(f,l)$ È $f$ >˜NÁ)· È $l$ >˜ & W ' È F g!ÿ 0 )TÖ {NþG-7- Ç ` 0 Z & &

$$q'_{jj'}(l) = \operatorname{argmax}_{q'} \sum \frac{x_j(f,l)x^*_{j'}(f,l)}{\left|x_j(f,l)x^*_{j'}(f,l)\right|} e^{j2\pi f q'} \tag{4.54}$$

J Z & & ´ @ 0 Z & & AGÿ $\boldsymbol{q}(l)$ È Ê y •# é A,´"d £ é A@ Ö j $\theta(l)$ ÈQ Ö é A@ Ö j $\phi(l)$ ÄFÓ x a 9

$$\boldsymbol{q}(l) = [\cos\theta(l)\cos\phi(l), \sin\theta(l)\cos\phi(l), \sin\phi(l)]^{\mathrm{T}} \tag{4.55}$$

* ¾ PHAT-GCC `AÑ Ç `,´(© ± _L¿!ÿ W ' $ à,´ È ¦ = _L¿-p &NÁ ,´ &LÉF >| $ à Ä

Õ ; • ) &NÁ ,´(© ±F >|6Š2« 4*6 È • j 6 4 Z B$B ê È ¯+XB é# F M0?± 5 AÑB$B ê - È FJE÷N¶ ,D L¿6Š2«1Ç# @ ã Ä $f$ \!åB N# Ž ¾1\ $k$ ZLö5Ô & È a ® ` ¶1\ $k$ Z ê,´3R E È 0 >FJE÷ £% 4*6Lb!'5 Ì0± È ) ¾!ÿ ZB$B êC§ û }5žB 1Ç# G-7- Ë Î &,´ Ÿ Ä

B 1Ç# ) š ¼ ¢ ,´ • O0; ÖE³ W ÈB$B ê3R E,´!“.ž)·F M0F 0!• Q ÈB é # F M0?± >5 $! r!Q.D 0¦ Ä

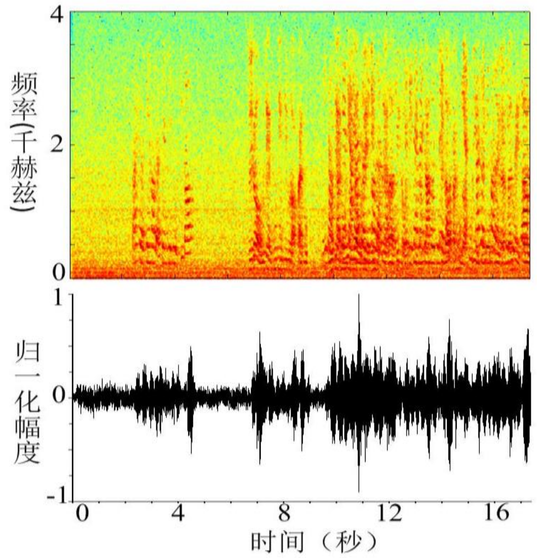
## 4. 3 性能评估

### 4. 3. 1 实验条件

ÎP¼ oL$K¯ íQ W ? j 10m×6m×3m È ¬F $f$ 9 = Ñ ˜Nþ w Œ j š $À ÈG÷LöAî 7 j XMOS £ ; ReSpeakerMicrophoneArray È ² . 4.5 p/j ÄG÷ gNÁ)· j 16kHz È 6 ˜ w 0 6 3 6 ZTÖ {Nþ È ] ó 3Aî 1 ZTÖ {Nþ È …N#EŸ & 64 } Audacity È6 FJF $f$ 16bit ž Ä .1 6 [+X MATLAB ¼C B @(1)à È £ 6 [ j MATLAB R2010a ¼VS2015/n j(x Ä \8² ÎP¼ 9 ÎLu …N# • 9 /-O ÎP¼ È /-O ÎP¼+X $' ý ÎP¼ Ô … f4ß ðB N# ¼ IMAGE Q »+O @ ž Ä wAîLe G 6 ó ` 1 'TÖ {Nþ Œ j $x$ E¤ È $À é A 6 [ j 90 Ö ¼ 145 Ö ÈD /ëTÖ {Le G 5 2£F ÈMATLAB /-O & •F gAî5ž Ä

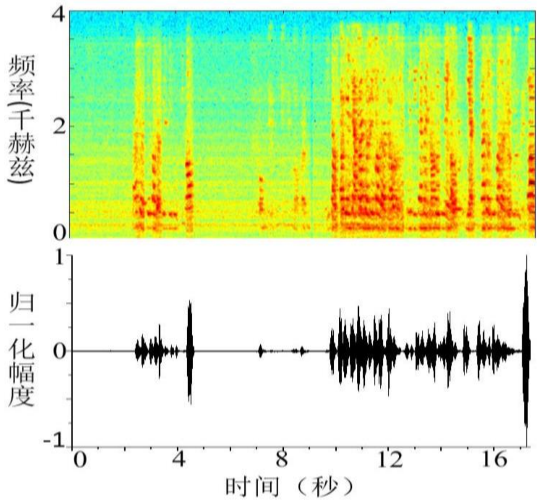
### 4. 3. 2 实际录音增强

Y+XTÖ {NþLe GG÷LöD B N# È+XLCMV 5 85$4ã >5ž% # ,´ é# F >|F jB N# Î j È OÆ x _ 0!åM‰N# W È'f ≯A 0 ûB$B È. ² ŒN¯ > B 0 ûB$B È ½ ŒN¯ AAè > 0 û 0C§B$B ÈG÷Lö ` FJFƒB N# ¼B Ba . ² . 4.6 p/j È ¯+X iF 1Ç# # • @ ’ > Î j B$B ê A ,´5 Ì ² . 4.7 p/j Ä




. 4. 6 G÷LöB N## ’ . ¼B Ba .

Fig. 4.6 Wavfrom and Spectrogram of Collected Voice




. 4. 7 iF ,´1Ç# Î j5 Ì

Fig. 4.7 Improved Algorithm Result

FJE÷ )" . 4.6 ¼ . 4.7 . È A iF ,´1Ç# ) ¢ ' § 9 ¸ -,´ Á f x Ì È 6< D •7- ëL"6ü Ÿ š È þB Ba . )" x Ì •-; ÈB 1Ç# ) O KB N#"Ñ 9FP @ ¸ W,´ • T È a-OE³ ? È ¤ ƒ •-; § 98Ÿ -,´ Î j x Ì Ä

### 4.3.3 语音分离能力评估

j ¶#{B B 1Ç# ,´B N# 6/ë7- Ë È wAîEÃ *B N# ' j $s_{out}$ È ò63 ·)^ [37]Gü,´B N# Lk Ž7- Ë " (Blocking Ability Ratios, BAR) È ¦ Ê y ² ; Ö

$$\mathrm{BAR}(j,i)=\frac{1}{l}\sum_{l}10\log_{10}\frac{\sum_{k}\left|[\boldsymbol{s}_{out,j}]_{i}\right|^{2}}{\sum_{k}\left|X_{1,j}(l,k)\right|^{2}} \tag{4.56}$$

? (4.56)Gü >˜?± Î j,´1\ $i$ Z ê È $j$ >˜ Î j5 Ì ]1\ $j$ Z ê,´ Á f0; Ö Äƒ $j=i$ & >˜#{B 1\ $j$ Z ê,´B N# a-O Ö È ƒ $j$ ¼$i$ =-(1y & È I>˜/j Î j1\ $i$ Z êEÃ * ]1\ $j$ Z ê,´ @ 6 W ? È $k$ >˜NÁ)·3R E Ä

/-O)ß ³ 6 [Aî5ž$' ý &L$ j 360ms ¼ 160msÈ4ß ðB N# j T ZB$B ê È\8²#{B ¶ /ý é# È 6 [ _ MVDR ÃLCMV ÃLCMV 5 8 WPF ¼ \ · iF ,´ é# Ä

>˜ 4.1 MVDR 1Ç# BAR

Tab.4.1 BAR of MVDR Algorithm

| B$B ê | T60=160ms EÃ * | | T60=360ms EÃ * | |
|---|---|---|---|---|
| | $i=1$ | $i=2$ | $i=1$ | $i=2$ |
| $j=1$ | -1.55 | -2.84 | -1.62 | -2.45 |
| $j=2$ | -3.40 | -0.81 | -3.05 | -1.09 |

>˜ 4.2 LCMV 1Ç# BAR

Tab.4.2 BAR of LCMV Algorithm

| B$B ê | T60=160ms EÃ * | | T60=360ms EÃ * | |
|---|---|---|---|---|
| | $i=1$ | $i=2$ | $i=1$ | $i=2$ |
| $j=1$ | -2.57 | -7.74 | -3.77 | -9.57 |
| $j=2$ | -8.98 | -2.02 | -8.50 | -3.05 |

>˜ 4.1 žB$ > MVDR é# XB N# 6/ë7- Ë : q 6 9L€ È v _ ) ÏB N# a-O ¸ ? È 6< DL¿-p$' ý &L$ Î W È ¦ 6 /ë7- Ë • 9 0 ËL} ~ ÈFP @,´ a-O • W ¶ Ä>˜ 4.2 ž B$ > LCMV 1Ç# B N# 6/ë7- Ë" MVDR j È v _ ) ÏB N# a-O0= Þ W ÈL¿-p$' ý & L$ Î Ð È ¦ 6/ë7- Ë Î j È v-( Ä,´B N# a-O • W Ä

>˜ 4. 3 LCMV 5 8 WPF 1Ç# BAR

Tab.4.3 BAR of LCMV+WPF Algorithm

| B$B ê | T60=160ms EÃ * $i=1$ | T60=160ms EÃ * $i=2$ | B$B ê | T60=360ms EÃ * $i=1$ | T60=360ms EÃ * $i=2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $j=1$ | -1.51 | -11.90 | $j=1$ | -2.14 | -7.42 |
| $j=2$ | -11.41 | -4.17 | $j=2$ | -10.81 | -5.02 |

>˜ 4. 4 iF ,´ 1Ç# BAR

Tab.4.4 BAR of improved Algorithm

| B$B ê | T60=160ms EÃ * $i=1$ | T60=160ms EÃ * $i=2$ | B$B ê | T60=360ms EÃ * $i=1$ | T60=360ms EÃ * $i=2$ |
|---|---|---|---|---|---|
| $j=1$ | -1.49 | -17.46 | $j=1$ | -1.52 | -13.66 |
| $j=2$ | -20.55 | -1.83 | $j=2$ | -15.47 | -2.12 |

>˜ 4.3 žB$ > LCMV 5 8 >5ž5$4ã% # 1Ç# ,´B N# 6/ë7- Ë ¸ j ÈB N# a-O Ö û ¾MVDR ¼LCMV {L$ È$' ý &L$,´ W ¯ ¦ 6/ë W7-L} ~ ÈB N# a-O • 9 p W Ä >˜ 4.4 žB$ > iF ,´1Ç# B N# 6/ë7- Ë>˜)à 0 - È )B N# a-O Ö0= W ¾ LCMV 5 8 WPF,´1Ç# È$' ý &L$ Î Ð • J ,8$ ¦ 6/ë W7-L} ~ È )B N# • T • 9 p Î W Ä > T /ý1Ç# X `AÑ ATF & $' ý ¡ ý È$' ý &L$CºK¯ È+X-( <K¯ Ö,´% # ˜ Ç `,´ `AÑ I ¼-O Î I • Cº W È p $' ý &L$ W J ,8$ > T/ý 1Ç# ,´ 6/ë 7- Ë 9 p L} ~ È 6< D) O K ',´ a-O • J 9 0 Ë Î Ð Ä k ƒ •-; È iF 1Ç# ,´B N# 6/ë x Ì 0 - Ä

### 4. 3. 4 输出信干噪比评估

/-O & Aî ÊTÖ {NþLe G ] ó ¼ 0 'TÖ {Nþ,´F 4ï j ò63 $x$ E¤ È X 30 Ö é A : Ð&é ¢ $À ÈD /ë 3 2£ ÈB$B ê A • 4 é A j 90 Ö ÈD /ë 5 2£ ÈB$B ê B • 4 é A j 145 Ö ÈAî5ž ¢ $À ¼4ß ðB N# ',´ Ï)· W8$-( < È EÃ • ',´ š" 6 [ _ 0dB Ã5dB Ã 10dB ¼15dB È 6 [#{B F /ý õ å È Ç `B N# Î j5 Ì Ä EÃ • š" W ? 6 [ X>˜ ] 5 * È wAî4ß ðB N# ' j $\boldsymbol{s}$ ÈEÃ * ',´ ¢ š" Ê y ² ;

$$\mathrm{SINR}=\frac{1}{l}\sum_{l}10\log_{10}\frac{\sum_{k}\left\|\boldsymbol{s}\right\|^{2}}{\sum_{k}\left\|\boldsymbol{s}-\boldsymbol{s}_{out}\right\|^{2}} \tag{4.57}$$

>˜ 4.5 5 AÑ Ç `$' ý 160ms,´EÃ * ¢ š" È>˜ 4.6 5 *¶ $' ý &L$ 300ms EÃ* ¢ š" 5 AÑ5 Ì Ä

>˜ 4.5 160ms$' ý ' & ;EÃ * ¢ š"

Tab.4.5 SINR on 160ms reverberation

| 1Ç# | EÃ • š" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0dB | 5dB | 10dB | 15dB |
| Z 4*6 | -12.34 | -9.52 | -7.72 | -6.54 |
| MVDR | -8.07 | -6.09 | -4.88 | -4.37 |
| LCMV | -8.65 | -5.82 | -1.83 | 1.25 |
| LCMV+WPF | -2.43 | 0.07 | 1.39 | 4.89 |
| \ ·1Ç# | -3.01 | -0.28 | 1.12 | 3.44 |

>˜ 4.6 360ms$' ý ' & ;EÃ * ¢ š"

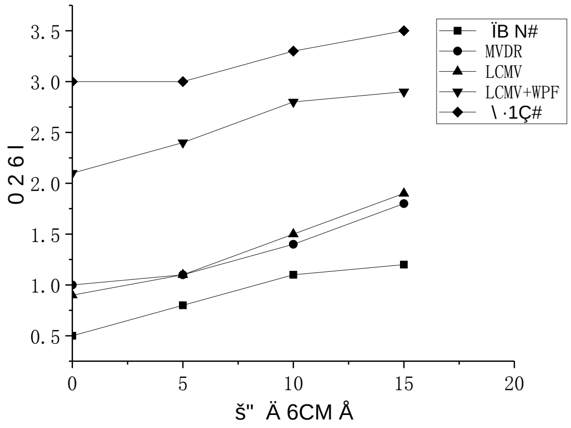
Tab.4.6 SINR on 360ms reverberation

| 1Ç# | EÃ • š" | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0dB | 5dB | 10dB | 15dB |
| Z 4*6 | -12.62 | -9.61 | -7.83 | -6.67 |
| MVDR | -8.21 | -6.23 | -4.97 | -4.40 |
| LCMV | -8.89 | -5.94 | -1.97 | 1.18 |
| LCMV+WPF | -2.40 | 0.11 | 1.35 | 4.86 |
| \ ·1Ç# | -2.89 | -0.22 | 1.01 | 3.39 |

FJE÷ 6 À>˜ 4.5 ¼>˜ 4.6 . È W ƒ-; • È MVDR 1Ç# X SINR éM'7- Î j 3dB È ¦ XEÃ • SNR E³ ~ & Î j > n ÈL¿-p SNR Q È EÃ * SINR ,´ w ÿ ? Ä LCMV 1Ç# XEÃ • SNR E³ ~ & X SINR 7- Q 4dB ÈL¿-p SNR Q È ¦ X SINR éM' Q ¸ J Ä LCMV 5 8 WPF 1Ç# X w SINR éM' x Ì 0 - È W ƒ 7- O Q 10dB Ä \ · i F ,´1Ç # X Q ¢ š" éM'+•F: ¾ LCMV 5 8 WPF 1Ç# È W ƒ Q 9dB Ä XEÃ • SNR E³ ~ & È \ ·1Ç# D 1\ 9/ý-( = W È XEÃ • SNR E³Q & È1\ 9/ý1Ç# X Q SINR éM' " \ ·1Ç# - È v _ \ ·1Ç# ÿ ? ¶B N# a-O Ö È X T65 {L$9ç Ç 0 Z £>' Ä \ ·1Ç# -(E³ ¾ } T/ý 1Ç# 7- 9 = A,´ ¢ š" Q ÈT ¦ _EÃ • š" E³ ~ õ å ; $7- ƒ)à * H ï Ä $' ý &L$ K¯ J ¯ MVDR ¼LCMV 1Ç# x Ì È6< ) LCMV 5 8 WPF 1Ç# ¼ \ ·1Ç# ¡ ýE³ ? Ä

4.3.5 增强语音 MOS 值

\8²#{B = <EÃ • š" ' & ; 41Ç# £ w k?ò ??ñ 6 (Mean Option Score, MOS) Ä ¦5 Ì þ ~ `Q j 1 ` 5 È k?± i ž,´ _B N#,´$5 Ö ¼ ò Ö È#{B B N# j J ZB$B ê 0C§AâB ,´ õ ' ÄF9 50 4ô È!ÿ4ô 3600 K¯ È"r £ w I Ä




. 4.8 41Ç# Î jB N# MOS

Fig. 4.8 MOS of Different Algorithms

þ . 4.8 -; * È iF 1Ç# B N# Î j5 Ì X MOS l : 9 ¸ W H ï È Aê _ ~ š" F _Q š" G-7-9ç Ç8Ÿ -,´B N# 6/ë ¼ ë ¢ Ã š ,´ x Ì Ä LCMV 5 8 WPF x Ì!Q { È MVDR 1Ç# ¼LCMV 1Ç# X J Z êB$B & Î j x Ì ¸ 08\ Ä

# 结　论

B N# Î j ¼ Á f _B N# 4*63+5 ] k?±,´ Ï7- Q ‡ Ä \ ·.D0¦ ¶6„ 8 0 H NÁ NLMS 1Ç# ¼ iF ,´ LCMV 5 8 WPF1Ç# È }65FJE÷ H F!•K¯ $ à é ? È7- O X üAâ ‘ & ; ¯8 F2 Ä% # ˜ FO f ‹ È þ6<9ç Ç8Ÿ -,´ #¸L”7- Ë × >65FJE÷ X O K ' a-O ¼ ëL”6ü Ÿ š T65 £>‘ È ) LCMV 5 8 WPF1Ç# F >| ¶ iF È ¦ DFJE÷F9 = <,´ ¢ ' •9ç Ç $ -,´B N# Î j x Ì Ä*6Aê 6 À ¼ ÎP¼ >˜ > È \ · é# X 0; Ä +X ]7- O9ç Ç8Ÿ -,´ x Ì Ä/-O ÎP¼ • þ ¦ W7- éM’P¼Añ ¶ \ ·1Ç# " P5 é# x Ì 8Ÿ - Ä

\ · ) $À 6/ë ¼ #¸L” é# F >| ¶.D0¦ È Ç ¶ 0 Ê @ Ì Ä v+a ¾ &L$ ¼"d £ 9L€ È ý 9 0 ËL NÈM0?±F 0!•.D0¦ Ö

(1) X \ ·.D0¦,´ AEC 1Ç# ] ÈNÁ 8 F2 Ä% # 1Ç# ] _+X P5 ,´-$ Õ# F >| Ï)· Ba `AÑ È; 0!• Œ 63<• +X)à Ba `AÑ é# / È v _ È?±63<•¦ F 1ÇGÿÈ ï X W7- ¼AÑ1Ç÷ r Ö T65 ]L$9ç Ç £>‘ Ä

(2) \ · ,´ B N# Î j1Ç# +X ` ¶ xP¼ Ÿ È !” ÈZ • M0?±.D0¦ $ Ð ö.ž,´ ð#{ é# È AñB N# 6/ë ¼L} š,´ W7- Ä

# 参 考 文 献

[1] "š { í È » E . R± 8 F2 ÄLe G ' 4*6 [M]. G Ü:+e € J *(x/n ,2009.

[2] Widrow B, Mantey P E, Griffiths L J, et al. Adaptive antenna systems[J]. Proceedings of the IEEE, 1967, 55(12): 2143-2159.

[3] Chevalier P, Blin A. Widely linear MVDR beamformers for the reception of an unknown signal corrupted by noncircular interferences[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(11): 5323-5336.

[4] Kellermann W. A self-steering digital microphone array[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Toronto, Ont., Canada, 1991: 3581-3584.

[5] Frost O L. An algorithm for linearly constrained adaptive array processing[J]. Proceedings of the IEEE, 1972, 60(8): 926-935.

[6] Zelinski R. A microphone array with adaptive post-filtering for noise reduction in reverberant rooms[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, New York, USA, 1988: 2578-2581.

[7] McCowan I A, Bourlard H. Microphone array post-filter based on noise field coherence[J]. IEEE Transactions on Speech and Audio Processing, 2003, 11(6): 709-716.

[8] Saruwatari H, Kajita S, Takeda K, et al. Speech enhancement using nonlinear microphone array with noise adaptive complementary beamforming[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Istanbul, Turkey, 2000, 2: II1049-II1052 vol. 2.

[9] Cohen I, Berdugo B. Speech enhancement based on a microphone array and log-spectral amplitude estimation[C]. Electrical and Electronics Engineers, Israel, 2002: 4-6.

[10] Balan R, Rosca J. Microphone array speech enhancement by Bayesian estimation of spectral amplitude and phase[C]. IEEE Sensor Array and Multichannel Signal Processing Workshop Proceedings, Rosslyn, Virginia, 2002: 209-213.

[11] Yan Z, Du L, Wei J, et al. Two-channel microphone array processing for speech enhancement[C]. IEEE International Symposium on Circuits and Systems, Bangkok, Thailand, 2003, 2: II-II.

[12] Cho J, Krishnamurthy A. Speech enhancement using microphone array in moving vehicle environment[C]. IEEE Intelligent Vehicles Symposium Proceedings, Hilton Hotel, Columbus, Ohio, USA, 2003: 366-371.

[13] Choi C, Kong D, Kim J, et al. Speech enhancement and recognition using circular microphone array for service robots[C]. Intelligent Robots and Systems (IROS), Las Vegas, NV, USA, 2003, 4: 3516-3521.

[14] Sekiya T, Kobayashi T. Speech enhancement based on multiple directivity patterns using a microphone array[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Que, 2004, 1: I-877.

[15] Slimene I, Jebara S B, Benazza-Benyahia A. Use of coherence in wavelet and multiwavelet domain for microphone array speech enhancement[C]. First International Symposium on Control, Communications and Signal Processing, Hammamet, Tunisia, 2004: 627-630.

[16] Halupka D, Rabi S A, Aarabi P, et al. Real-time dual-microphone speech enhancement using field programmable gate arrays[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Philadelphia, Pennsylvania, USA, 2005, 5: v/149-v/152 Vol. 5.

[17] Wang D, Yin F. Subband adaptive beamforming for microphone array speech enhancement[C]. IEEE International Conference on Signal Processing, Guilin, China, 2006: 4.

[18] Halupka D, Rabi A S, Aarabi P, et al. Low-power dual-microphone speech enhancement using field programmable gate arrays[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2007, 55(7): 3526-3535.

[19] Gupta M, Douglas S C. An iterative spatio-temporal speech enhancement algorithm for microphone arrays[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Las Vegas Strip, USA, 2008: 81-84.

[20] Yiu K F C, Ho C H, Grbric N, et al. Reconfigurable acceleration of microphone array algorithms for speech enhancement[C]. Application-Specific Systems, Architectures and Processors, Leuven, Belgium, 2008: 203-208.

[21] Zhang H, Fu Q, Yan Y. A compact-microphone-array-based speech enhancement algorithm using auditory subbands and probability constrained postfilter[C]. Hands-Free Speech Communication and Microphone Arrays, Trento, Italy, 2008: 192-195.

[22] Cheng N, Liu W J, Li P, et al. Microphone array speech enhancement based on a generalized post-filter and a novel perceptual filter[C]. IEEE International Conference on Signal Processing, Beijing, China, 2008: 370-373.

[23] Hu J S, Huang C Y, Yang C H, et al. Sound source tracking and speech enhancement by microphone array on an embedded dual-core processor platform[C]. Advanced robotics and Its Social Impacts (ARSO 2008), Taibei, 2008: 1-6.

[24] Song H, Liu J. First-order differential microphone array for robust speech enhancement[C]. International Conference on Audio, Language and Image Processing, Shanghai, China, 2008: 1461-1466.

[25] Wang D, Zheng J, Wu T. A broadband beamforming method based on microphone array for the speech enhancement[C]. International Conference on Signal Processing Systems (ICSPS), Dalian, China, 2010, 2: V2-363-V2-366.

[26] Milani A A, Kannan G, Panahi I M S, et al. A multichannel speech enhancement method for functional MRI systems using a distributed microphone array[C]. Engineering in Medicine and Biology Society, Minneapolis, MN, USA, 2009: 6946-6949.

[27] Shan L, Yang P, Zhou J. The Mobile Microphone Array Speech Enhancement Technology Based on FEA[C]. International Conference on Electrical and Control Engineering (ICECE), Wuhan, China, 2010: 2375-2378.

[28] Yao C C. Adaptive microphone array-based filter in the speech enhancement[C]. Networked Computing and Advanced Information Management (NCM), Gyeongju, South Korea, 2011: 237-242.

[29] Ma X, Mu K. Study on 2-dimensional microphone circular array speech enhancement algorithm based on the DOA[C]. IEEE Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology (EMEIT), Harbin, China, 2011, 5: 2505-2508.

[30] Mirsamadi S, Hansen J H L. Multichannel feature enhancement in distributed microphone arrays for robust distant speech recognition in smart rooms[C]. IEEE Spoken Language Technology Workshop (SLT), South Lake Tahoe, NV, USA, 2014: 507-512.

[31] Hsu C C, Cheong K M, Chi T S. A non-uniformly distributed three-microphone array for speech enhancement in directional and diffuse noise field[C]. International Symposium on Chinese Spoken Language Processing (ISCSLP), Singapore, 2014: 574-578.

[32] Sakanashi R, Ono N, Miyabe S, et al. Speech enhancement with ad-hoc microphone array using single source activity[C]. Asia-Pacific Signal and Information Processing Association Annual Summit and Conference (APSIPA), Kaohsiung, Taiwan, 2013: 1-6.

[33] Fen Z X, Wei Z, Liu Y T, et al. A DBF method of localizing accuracy improvement and speech enhancement based on a new microphone arrays[C]. IEEE International Conference on Signal Processing (ICSP), Beijing, China, 2012, 1: 303-306.

[34] Yu C, Su L. Speech enhancement based on the generalized sidelobe cancellation and spectral subtraction for a microphone array[C]. International Congress on Image and Signal Processing (CISP), Shenyang, China, 2015: 1318-1322.

[35] Huang Y A, Luebs A, Skoglund J, et al. Globally optimized least-squares post-filtering for microphone array speech enhancement[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Shanghai, China, 2016: 380-384.

[36] Schwartz O, Braun S, Gannot S, et al. Source Separation, Dereverberation and Noise Reduction Using LCMV Beamformer and Postfilter[C]. International Conference on Latent Variable Analysis and Signal Separation, Grenoble, France, 2017: 182-191.

[37] Schwartz O, Gannot S, Habets E A P. Multispeaker LCMV Beamformer and Postfilter for Source Separation and Noise Reduction[J]. IEEE/ACM Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2017, 25(5): 940-951.

[38] Markovich-Golan S, Gannot S, Cohen I. A sparse blocking matrix for multiple constraints GSC beamformer[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing (ICASSP), Kyoto, Japan, 2012: 197-200.

[39] Markovich S, Gannot S, Cohen I. Multichannel eigenspace beamforming in a reverberant noisy environment with multiple interfering speech signals[J]. IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing, 2009, 17(6): 1071-1086.

[40] Gannot S, Burshtein D, Weinstein E. Signal enhancement using beamforming and nonstationarity with applications to speech[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2001, 49(8): 1614-1626.

[41] Ephraim Y, Malah D. Speech enhancement using a minimum-mean square error short-time spectral amplitude estimator[J]. IEEE Transactions Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1984, 32(6): 1109-1121.

[42] Yantorno R E. Co-channel speech and speaker identification study[R]. Temple Univ Philadelphia PA, USA, 1998.

[43] Yantorno R E. A study of the spectral autocorrelation peak valley ratio (SAPVR) as a method for identification of usable speech and detection of co-channel speech[J]. Temple Univ., Speech Processing Lab. Tech. Report, Philadelphia, PA, USA, 2000.

[44] Yantorno R E, Krishnamachari K R, Lovekin J M, et al. The spectral autocorrelation peak valley ratio (sapvr)-a usable speech measure employed as a co-channel detection system[C]. IEEE International Workshop on Intelligent Signal Processing (WISP), London, UK, 2001, 2: 1.

[45] Ofoegbu U O, Iyer A N, Yantorno R E, et al. Unsupervised indexing of conversations with short speaker utterances[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2007: 1-11.

[46] Smolenski B Y, Yantorno R E, Benincasa D S, et al. Co-channel speaker segment separation[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing (ICASSP), Orlando, FL, USA, 2002, 1: I-125-I-128.

[47] Shah J K, Iyer A N, Smolenski B Y, et al. Robust voiced/unvoiced classification using novel features and Gaussian mixture model[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, Montreal, Que, Canada, 2004: 17-21.

[48] Moattar M H, Homayounpour M M. Speech Overlap Detection using Spectral Features and its Application in Speech Indexing[C]. Information and Communication Technologies, Damascus, Syria, 2006, 1: 1270-1274.

[49] Nickel R M, Iyer A N. A novel approach to automated source separation in multispeaker environments[C]. IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing, Toulouse, France, 2006, 5: V-V.

[50] Ofoegbu U O, Iyer A N, Yantorno R E, et al. A simple approach to supervised speaker indexing[C]. International Symposium on Intelligent Signal Processing and Communications, Tottori, Japan, 2006: 339-342.

[51] Dessein A, Cont A, Lemaitre G. Real-time detection of overlapping sound events with non-negative matrix factorization[M]//Matrix Information Geometry. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013: 341-371.

[52] Iyer A N, Ofoegbu U O, Yantorno R E, et al. Speaker Recognition in Adverse Conditions[C]. IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, 2007: 1-8.

[53] Shokouhi N, Sadjadi S O, Hansen J H L. Co-channel speech detection via spectral analysis of frequency modulated sub-bands[C]. Fifteenth Annual Conference of the International Speech Communication Association, Singapore, 2014, 17: 1-20.

[54] Jia M, Sun J, Deng F, et al. Single source bins detection-based localisation scheme for multiple speech sources[J]. Electronics Letters, 2017, 53(6): 430-432

[55] Schmidt R. Multiple signal classification (MUSIC)[J]. ESL Technical Memo TM 1098, 1979.

[56] Brandstein M, Ward D. Microphone Arrays[J]. Digital Signal Processing. Springer-Verlag, 2002.

[57] 7 ¯ – . ‡ ' 4*6 (1\ 9(x )[M]. G Ü:$5 ~ W – *(x/n ,2012.

[58] Shynk J J. Frequency-domain and multirate adaptive filtering[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 1992, 9(1): 14-37.

[59] Ciochină S, Paleologu C. An optimized NLMS algorithm for acoustic echo cancellation[C]. International Symposium on Signals, Circuits and Systems, Iasi, Romania, 2015: 1-4.

[60] Ephraim Y, Malah D. Speech enhancement using a minimum-mean square error short-time spectral amplitude estimator[J]. IEEE Transactions on acoustics, speech, and signal processing, 1984, 32(6): 1109-1121.

# 致　谢


T ¤,´ …. +O#ß £ 6E÷ ë È ¸ J7- Ë ¼ • – &" G- Ç ` ¶ ¸ W,´B3Q È F 0Lf!å f 9çN· ` È OL$ u% ¶Aè J5¾ -,´ ö Ä

OÆ x OBR A,´ , 8Lx ¶ ‰ ¸ ÈLx61 8 )0 .D$!$!' (a È ) Œ 0 M =9 ÈF /ý2î/Ž O ¶ A Ä • – )AÝ ] = õ _ ¶ W æ,´ K à ?Aö ÈF ‰ J A ¸ J Î+X W °7- Ä!ÿ ƒ Fw `LîNÈ A B' ‰ È k 7-9ç Ç ¸ -,´@ ã é x È • – J ² … ® ` M63L NÈ,´@ Ö È>§ ó OBRLx61 8 Ä

< &F ?± OBR A ÎP¼ Ô,´!ç/¿ Þ ‰ ¸ È!ç61 8 = õ X 0 .DN©- :5 A 7 > é A ÈF ‰ , A ?± { ÃD? Î È ¸ J & I ‰ J A ² … 4 » ¼ Š ê Ä !ç61 8 a À A C : Œ Ç } 0 Ê?± Î ¢ ÈFJE÷8 » ¼ { Ç j/n J ¼ W G Š * Ä 9,´ CQ)^ Ä/• o!ç61 8DÛ ƒ • ç È ŒNª Y Ä

{ >?± OBR" JAîAÑ OL$ 0C§B8AêL NÈ,´ ± + ÃPœ ® ¼C¥ Y w < – ÈF 9 < z,´ 8 t ¼ 8 È OBR X – • ¼+O#k ]5 ¸ A /ñ,´ ^ Ù Ä

0 >?± OBR A,´ æ ê È X6ü >5 ¶ A Aè J _ 1 ¼UC á ÈAÙ A X"r –FƒD :7- O Û9v Ù È f9ç $ J ÈF 6<Nª Y ¼ @.D0¦+O – J Ä

# 大连理工大学学位论文版权使用授权书

本人完全了解学校有关学位论文知识产权的规定，在校攻读学位期间论文工作的知识产权属于大连理工大学，允许论文被查阅和借阅。学校有权保留论文并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印、或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。

学位论文题目：声学回声消除与波束成形语音增强方法研究

作 者 签 名：______ 日期：____年____月____日

导 师 签 名：______ 日期：____年____月____日