(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 공개특허공보(A)

(11) 공개번호 10-2017-0104100
(43) 공개일자 2017년09월14일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
G01W 1/08 (2006.01) *G01W 1/02* (2006.01)
G06F 17/14 (2006.01) *G06F 17/16* (2006.01)
(52) CPC특허분류
G01W 1/08 (2013.01)
G01W 1/02 (2013.01)
(21) 출원번호 10-2016-0026638
(22) 출원일자 2016년03월04일
심사청구일자 2016년03월04일

(71) 출원인
부경대학교 산학협력단
부산광역시 남구 신선로 365 (용당동, 부경대학교)
(72) 발명자
권병혁
부산광역시 수영구 광안해변로15번길 68 505동 1402호 (남천동,남천삼익뉴비치아파트)
김박사
부산광역시 동래구 석사로33번길 25 202호 (사직동,임페리얼빌리지)
(뒷면에 계속)
(74) 대리인
특허법인 대아

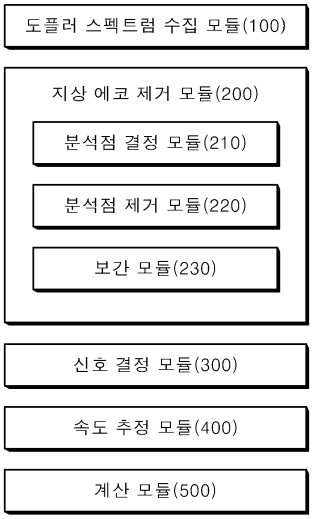
전체 청구항 수 : 총 8 항

(54) 발명의 명칭 **윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템 및 그 방법**

(57) 요 약

본 발명은 지형에 따른 윈드프로파일러의 클러터 발생을 소프트웨어적으로 제거하는 것으로, 주방사부의 대기 신호가 부방사부에서 수신된 강력한 지형에코에 의해 묻혀버리는 현상을 방지하여, 윈드프로파일러의 관측 정확도를 향상시키는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템 및 그 방법을 제공한다.

대 표 도 - 도1



(52) CPC특허분류
G06F 17/142 (2013.01)
G06F 17/16 (2013.01)
(72) 발명자
김광호
부산광역시 동구 망양로685번길 11 (수정동)
김민성
부산시 남구 황령대로 319번길 26 103-1501

이 발명을 지원한 국가연구개발사업
과제고유번호 1365002137
부처명 기상청
연구관리전문기관 기상청
연구사업명 기상기술개발사업
연구과제명 윈드프로파일러 자료의 정확도 개선 기술 개발
기 여 율 1/1
주관기관 부경대학교 산학협력단
연구기간 2015.05.01 ~ 2016.04.30

명 세 서

청구범위

청구항 1

윈드프로파일러에서 도플러 스펙트럼을 통해 기상 관측 정보를 수집하는 도플러 스펙트럼 수집 모듈;

수집된 상기 기상 관측 정보의 지형에 따른 대기 신호 묻힘 현상을 고속 푸리에 변환을 통해 제거하는 지상 에코 제거 모듈;

지상 에코가 제거된 상기 기상 관측 정보의 실제 대기 신호 첨두를 결정하는 신호 결정 모듈;

상기 결정된 첨두를 기준으로 연직빔과 경사빔의 시선속도를 추정하는 속도 추정 모듈;

상기 시선 속도에 따라 동서 성분(U), 남북 성분(V) 및 연직 성분(W)의 바람벡터를 산출하는 계산 모듈을 포함하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 지상 에코 제거 모듈은 주파수 혹은 평균 시선 속도가 0인 직류 라인 주변의 고속 푸리에 변환 분석점을 결정하는 분석점 결정 모듈을 포함하는 것을 특징으로 하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 지상 에코 제거 모듈은 결정된 고속 푸리에 변환 분석점을 제거하는 분석점 제거 모듈을 포함하는 것을 특징으로 하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 지상 에코 제거 모듈은 보존된 2개의 인접한 고속 푸리에 변환 분석점을 이용하여 보간하는 보간 모듈을 포함하는 것을 특징으로 하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템.

청구항 5

윈드프로파일러에서 도플러 스펙트럼을 통해 기상 관측 정보를 수집하는 도플러 스펙트럼 수집 단계;

에코 제거 모듈에서 지형에 따른 대기 신호 묻힘 현상을 고속 푸리에 변환을 통해 제거하는 지상 에코 제거 단계;

신호 결정 모듈에서 실제 대기 신호의 첨두를 결정하는 신호 결정 단계;

속도 추정 모듈에서 결정된 첨두를 기준으로 연직빔과 경사빔의 시선속도를 추정하는 속도 추정 단계;

계산 모듈에서 동서 성분(U), 남북 성분(V) 및 연직 성분(W)의 바람벡터를 산출하는 계산 단계을 포함하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 방법.

청구항 6

제 5항에 있어서,

상기 지상 에코 제거 단계은 상기 분석점 결정 모듈에서 주파수 혹은 평균 시선속도가 0인 직류 라인 주변의 고속 푸리에 변환 분석점을 결정하는 분석점 결정 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 지상 에코 제거 단계는 상기 분석점 제거 모듈에서 결정된 고속 푸리에 변환 분석점을 제거하는 분석점 제거 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 방법.

청구항 8

제 7항에 있어서,

상기 지상 에코 제거 모듈은 보간 모듈에서 보존된 2개의 인접한 고속 푸리에 변환 분석점을 이용하여 보간하는 보간 단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 방법.

발명의 설명

기 술 분 야

[0001] 본 발명은 지형에 따른 윈드프로파일러의 클러터 발생을 소프트웨어적으로 제거하는 것으로, 지형에 따른 대기 신호의 변화를 고속 푸리에 변환을 통해 제거하는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템 및 그 방법이다.

배 경 기 술

[0002] 윈드프로파일러(Wind Profiler Rader, WPR)는 대기 중에서 바람벡터의 방향과 크기를 관측하는데 이용되는 중요한 관측 기기이다. 기상학적인 연구에 많이 활용되고 있으며, 수 분의 시간분해능과 수십미터의 공간분해능으로 바람의 연직구조를 제공할 수 있다. 이러한 성능으로 인하여, 위험기상을 분석하거나, 수치예보모델의 예측정확도를 높이기 위한 기초 자료로 널리 활용되고 있다.

[0003] 윈드프로파일러는 바람벡터의 연직 프로파일을 결정하기 위하여 도플러 빔 방식을 사용하고, 고정된 방위각과 고도각에 따라 전자기 펄스파를 송신한다. 대기 산란 과정의 특징에 의해 수신된 신호는 도플러 지연에 따른 위상차가 발생하고, 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)으로 산출된 도플러 스펙트럼을 통해서 대기의 바람벡터 성분을 결정한다.

[0004] 윈드프로파일러 자료는 펄스파의 송수신 과정에서 지형에코(Ground Echo), 라디오간섭, 새 에코(Bird Echo) 및 복합적 에코와 같은 다양한 비대기신호에 의해 오염될 수 있기 때문에, 도플러 스펙트럼에서 비대기 신호의 제거 및 개선이 선행되어야 한다.

[0005] 윈드프로파일러의 안테나에서 특정방향으로 전파를 집중시켜 방사하는 빔을 주방사부(Main Lobe)라고 한다. 또한, 주방사부 주변으로 방사되는 약한 전파 빔을 부방사부(Side Lobe)라 한다.

[0006] 윈드프로파일러의 관측 고도는 주방사부에서 송신된 전파가 다시 수신되기까지 걸린 시간으로 결정된다. 수평방향에 존재하는 물체도 윈드프로파일러와의 거리를 두고 있으면, 그 거리에 상응하는 고도의 신호로 관측된다. 윈드프로파일러의 주방사부는 천정을 향해 방사되는데 비해, 부방사부는 다양한 고도각과 방위각으로 방사되기 때문에 지상의 다양한 물체(건물, 자동차, 산 등)에 부딪혀 산란된다. 이러한 윈드프로파일러의 지형에코는 부방사부에서 수신된 강한 지형에코에 의해 주방사부의 대기 신호가 묻혀버리는 경우 발생하는 것이다.

[0007] 지형에코의 제거 방법은 클러터 펜스와 같은 하드웨어 방법과, 자료처리를 통한 소프트웨어적 방법이 있다. 소프트웨어 방법 중 가장 전통적인 방법은 Strauch(1982)에 의한 직류(Direct DCurrent, DC) 성분 제거 방법이다. 직류 성분은 주파수가 0Hz인 신호, 혹은 평균 시선 속도가 $0^{ms^{-1}}$ 인 신호를 의미하며, 고도별로 시선 속도가 $0^{ms^{-1}}$ 인 지점을 통칭하여 DC라인이라고 한다. 또한, 지형에코는 정지해있는 물체에서 산란되는 신호이기 때문에, DC성분으로 나타난다.

[0008] 우리나라는 복잡한 산악지형으로 이루어져 있기 때문에, 우리나라에 설치된 윈드프로파일러는 비대기 신호 중 산악지형에 의한 지형에코에 더욱 주의해야 한다.

[0009] 강원지방기상청의 윈드프로파일러 주변 지형은, 서쪽과 남쪽의 복잡한 산악지형으로 인하여 지리적으로 지형에코가 발생하기 쉬운곳에 위치한다. 반경 5km 이내에는 해발 200m 이하의 산악지형이 분포하고, 반경 5~10km에는 해발 400~600m의 산악지형이 분포한다. 반경 10km부터는 대부분 800m 이상의 산악지형으로 이루어져있다. 또한,

동쪽과 북쪽은 반경 5km 이내에 해발 30m 이하의 평탄한 지형으로 이루어져있고, 동쪽으로 5km 밖으로는 해안이다. 그만큼 지형에코의 발생 가능성이 매우 높은 곳에 해당한다.

[0010] 하지만, 강원지방기상청의 윈드프로파일러를 비롯하여 현재 국내 대부분의 윈드프로파일러는 클러터 펜스가 설치되지 않았기에, 소프트웨어 방법을 통해 자료처리가 이루어져야 한다.

선행기술문헌

특허문헌

[0011] (특허문헌 0001) 대한민국 등록특허공보 제 1,294,681호(2013.08.02. 등록)

(특허문헌 0002) 대한민국 등록특허공보 제 1,255,736호(2013.04.09. 등록)

발명의 내용

해결하려는 과제

[0012] 본 발명의 목적은 주방사부의 대기 신호가 부방사부에서 수신된 강력한 지형에코에 의해 묻혀버리는 현상을 방지하는, 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템 및 방법을 제공하는 것이다.

과제의 해결 수단

[0013] 상술한 목적을 달성하기 위해, 본 발명은 윈드프로파일러에서 도플러 스펙트럼을 통해 기상 관측 정보를 수집하는 도플러 스펙트럼 수집 모듈, 지형에 따른 대기 신호 묻힘 현상을 고속 푸리에 변환을 통해 제거하는 지상 에코 제거 모듈, 실제 대기 신호의 첨두를 결정하는 신호 결정 모듈, 결정된 첨두를 기준으로 연직빔과 경사빔의 시선속도를 추정하는 속도 추정 모듈, 동서 성분 바람벡터(U), 남북 성분 바람벡터(V) 및 연직 성분(W)의 바람벡터를 산출하는 계산 모듈을 포함한다.

[0014] 지상 에코 제거 모듈은 DC라인 주변의 FFT 분석점을 결정하는 분석점 결정 모듈을 포함한다.

[0015] 지상 에코 제거 모듈은 결정된 FFT 분석점을 제거하는 분석점 제거 모듈을 포함한다.

[0016] 지상 에코 제거 모듈은 보존된 2개의 인접한 FFT 분석점을 이용하여 보간하는 보간 모듈을 포함한다.

[0017] 윈드프로파일러에서 도플러 스펙트럼을 통해 기상 관측 정보를 수집하는 도플러 스펙트럼 수집 단계, 에코 제거 모듈에서 지형에 따른 대기 신호 묻힘 현상을 고속 푸리에 변환을 통해 제거하는 지상 에코 제거 단계, 신호 결정 모듈에서 실제 대기 신호의 첨두를 결정하는 신호 결정 단계, 속도 추정 모듈에서 결정된 첨두를 기준으로 연직빔과 경사빔의 시선속도를 추정하는 속도 추정 단계, 계산 모듈에서 동서 성분 바람벡터(U), 남북 성분 바람벡터(V) 및 연직 성분(W)의 바람벡터를 산출하는 계산 단계을 포함한다.

[0018] 지상 에코 제거 단계은 상기 분석점 결정 모듈에서 DC라인 주변의 FFT 분석점을 결정하는 분석점 결정 단계를 포함한다.

[0019] 지상 에코 제거 단계는 상기 분석점 제거 모듈에서 결정된 FFT 분석점을 제거하는 분석점 제거 단계를 포함한다.

[0020] 지상 에코 제거 모듈은 보간 모듈에서 보존된 2개의 인접한 FFT 분석점을 이용하여 보간하는 보간 단계를 포함한다.

발명의 효과

[0021] 본 발명은 주방사부의 대기 신호가 부방사부에서 수신된 강력한 지형에코에 의해 묻혀버리는 현상을 방지하여, 윈드프로파일러의 관측 정확도를 향상시키는 윈드프로파일러의 지형클러터 제거 시스템 및 그 방법을 제공한다.

도면의 간단한 설명

[0022] 도 1은 본 발명에 따른 윈드프로파일러의 지형 클러터 제거 시스템의 개념도.

도 2는 본 발명에 따른 윈드프로파일러의 지형 제거 방법의 순서도.

도 3은 저층 관측 방식에서 지상에코를 제거하기 전의 도플러 스펙트럼.

도 4는 고층 관측 방식에서 지상에코를 제거하기 전의 도플러 스펙트럼.

도 5는 저층 및 고층 관측 방식에서 지상에코를 제거하기 전 윈드프로파일러와 라디오존데의 바람벡터 비교도.

도 6은 저층 관측 방식에서 지상에코를 제거한 후의 도플러 스펙트럼.

도 7은 저층 관측 방식에서 지상에코를 제거한 후 윈드프로파일러와 라디오존데의 바람벡터 비교도.

도 8은 지상에코의 제거 전/후 윈드프로파일러의 RMSE 비교도.

도 9는 지상에코를 제거 전/후 윈드프로파일러와 라디오존데의 바람벡터 분포도.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

[0023] 이하, 도면을 참조하여 본 발명의 실시예를 상세히 설명하기로 한다.

[0024] 그러나 본 발명은 이하에서 개시되는 실시예에 한정되는 것이 아니라 서로 다른 다양한 형태로 구현될 것이며, 단지 본 실시예들은 본 발명의 개시가 완전하도록 하며, 통상의 지식을 가진 자에게 발명의 범주를 완전하게 알려주기 위해 제공되는 것이다. 도면상의 동일 부호는 동일한 요소를 지칭한다.

[0025] 도 1은 본 발명에 따른, 윈드프로파일러의 지형 클러터 제거 시스템의 개념도이다.

[0026] 본 발명에 따른 윈드프로파일러의 지형 클러터 제거 시스템은, 도 1에 도시된 바와 같이, 윈드프로파일러에서 도플러 스펙트럼을 통해 기상 관측 정보를 수집하는 도플러 스펙트럼 수집 모듈(100)과, 지형에 따른 대기 신호 묻힘 현상을 고속 푸리에 변환을 통해 제거는 지상 에코 제거 모듈(200)과, 실제 대기 신호의 첨두를 결정하는 신호 결정 모듈(300)과, 결정된 첨두를 기준으로 연직빔과 경사빔의 속도를 추정하는 속도 추정 모듈(400) 및 바람벡터를 산출하는 계산 모듈(500)을 포함한다.

[0027] 도플러 스펙트럼 수집 모듈(100)은 윈드프로파일러에서 상공으로 발사된 전파가 대기의 굴절률에 의해 공간적인 흔들림이 생기고, 그 일부가 후방으로 산란되며 다시 안테나로 돌아오는 것을 수신한다.

[0028] 지상 에코 제거 모듈(200)은 분석점을 결정하는 분석점 결정 모듈(210)과, 결정된 분석점을 제거하는 분석점 제거 모듈(220)과, 보존된 분석점을 보간하는 보간 모듈(230)을 포함한다.

[0029] 분석점 결정 모듈(210)은 직류 성분의 주파수가 0Hz인 신호이거나, 평균 시선속도가 0 ms^{-1} 인 DC라인으로 나타나는, 지형에코에 해당하는 복수의 고속 푸리에 변환 분석점을 결정한다.

[0030] 분석점 제거 모듈(220)은 분석점 결정 모듈에서 결정된 고속 푸리에 변환 분석점에 기록된 속도 성분의 값을 제거하여 지형에코에 의해 묻혀있던 대기신호가 뚜렷하게 나타나도록 한다.

[0031] 보간 모듈(230)은 제거된 분석점 외에 보존된 2개의 인접한 고속 푸리에 변환 분석점을 이용하여, 수신된 신호가 압축, 전송 도중에 감쇠, 수신 회로에서의 판별 작용 등에 의해 약해지거나 누락된 신호 요소를 동기적으로 회복하도록 신호를 보간한다.

[0032] 신호 결정 모듈(300)은 지형에코가 제거된 도플러 스펙트럼을 통해서 실제 대기 신호의 첨두(Peak)를 결정한다.

[0033] 속도 추정 모듈(400)은 결정된 첨두 신호를 기준으로 하나의 연직빔과 4개의 경사빔에 대한 시선 속도를 추정한다.

[0034] 계산 모듈(500)은 동서 성분 바람벡터(U), 남북 성분 바람벡터(V) 및 연직성분(W)의 바람벡터를 산출한다.

[0035] 도 2은 본 발명에 따른, 윈드프로파일러의 지형 클러터 제거 방법의 순서도이다.

[0036] 본 발명에 따른 윈드프로파일러의 지형 클러터 제거 방법은, 도 2에 도시된 바와 같이, 윈드프로파일러에서 도플러 스펙트럼을 통해 기상 관측 정보를 수집하는 도플러 스펙트럼 수집 단계(S1)와, 에코 제거 모듈에서 지형에 따른 대기 신호 묻힘 현상을 고속 푸리에 변환을 통해 제거하는 지상 에코 제거 단계(S2)와, 신호 결정 모듈에서 실제 대기 신호의 첨두를 결정하는 신호 결정 단계(S3)와, 속도 추정 모듈에서 결정된 첨두를 기준으로 연직빔과 경사빔의 시선 속도를 추정하는 속도 추정 단계(S4) 및 바람벡터를 산출하는 계산 단계(S5)를 포함한다.

[0037] 도플러 스펙트럼 수집 단계(S1)은 윈드프로파일러에서 상공으로 발사된 전파가 대기의 굴절률에 의해 공간적인 흔들림이 생기고, 그 일부가 후방으로 산란되며 다시 안테나로 돌아오는 것을 수신한다.

[0038] 지상 에코 제거 단계(S2)는 분석점 결정 단계(S2-1)와, 분석점 제거 단계(S2-2)와, 보간 단계(S2-3)를 포함한다.

[0039] 분석점 결정 단계(S2-1)는 분석점 결정 모듈(210)에서 직류 성분의 주파수가 0Hz인 신호이거나, 평균 시선속도가 $0^{ms^{-1}}$ 인 DC라인으로 나타나는, 지형에코에 해당하는 복수의 고속 푸리에 변환 분석점을 결정한다.

[0040] 분석점 제거 단계(S2-2)는 분석점 결정 단계(S2-1)에서 결정된 고속 푸리에 변환 분석점에 기록된 속도 성분의 값을, 분석점 제거 모듈(220)에서 제거하여 지형에코에 의해 묻혀있던 대기신호가 뚜렷하게 나타나도록 한다.

[0041] 보간 단계(S2-3)는 분석점 제거 단계(S2-2)제거된 분석점 외에 보존된 2개의 인접한 고속 푸리에 변환 분석점을 이용하여, 수신된 신호가 압축, 전송 도중에 감쇠, 수신 회로에서의 판별 작용 등에 의해 약해지거나 누락된 신호 요소를 보간 모듈(230)에서 동기적으로 회복하도록 신호를 보간한다.

[0042] 신호 결정 단계(S-3)는 지형에코가 제거된 도플러 스펙트럼을 통해서 신호 결정 모듈(300)에서 실제 대기 신호의 첨두를 결정한다.

[0043] 속도 추정 단계(S-4)은 결정된 첨두 신호를 기준으로 속도 추정 모듈(400)에서 하나의 연직빔과 4개의 경사빔에 대한 시선 속도를 추정한다.

[0044] 계산 단계(S-5)는 계산 모듈(500)에서 동서 성분 바람벡터(U), 남북 성분 바람벡터(V) 및 (W)의 바람벡터를 산출한다.

[0045] 이러한 과정을 통해 산출된 바람벡터는 라디오존데(Radio Sonde, RS)의 바람벡터를 기준으로 검증된다.

[0046] 본 발명의 검증을 위해, 강원지방기상청에 설치된 프랑스 Degreane사의 UHF 윈드프로파일러(PCL 1300)의 관측 자료를 이용하였다. PCL 1300은 저층 관측 방식(Low Mode)과 고층 관측 방식(High Mode)으로 관측한다. 이와 같은 관측 방식은 윈드프로파일러에서 방사하는 전파의 펄스폭(Pulse Width)과 펄스 반복 주파수(Pulse Repetition Frequency, PRF)의 가변적인 설정에 의해 구분된다. 펄스폭과 펄스 반복 주파수는 윈드프로파일러의 공간적 관측 해상도와 유효 관측 고도에 영향을 준다. 펄스폭이 길수록 관측해상도는 낮아지고, 펄스 반복 주파수가 작을수록 유효 관측 고도는 높아진다. 이러한 특징에 의하여 저층 관측 방식은 관측 해상도가 높고, 유효 관측 고도가 낮다. 또한, 고층 관측 방식은 관측 해상도가 낮고 유효 관측 고도가 높다. 본 발명에 사용된 PCL 1300은 총 71개 고도의 바람벡터를 수집하며, 저층 관측 방식의 관측 해상도와 유효 관측 고도는 각 72m, 9700m이고, 고층 관측 방식은 각 164m, 15000m이다.

[0047] PCL 1300의 바람벡터 정확도 개선을 위하여 관측 해상도가 높은 저층 관측 방식의 자료를 이용하였고, 고층 관측 방식의 자료는 PCL 1300의 지형 클러터 영향을 검증하기 위해 활용되었다. 10분 간격으로 수집되는 윈드프로파일러 자료의 비교 및 검증을 위해 강원지방기상청에서 가디오존데를 27회 비양하였다. 또한, 라디오존데 자료는 독일 GRAW사의 DFM-06모델을 사용하였고, GRAW사에서 개발한 GRAWMET 소프트웨어를 통해 처리된 자료를 이용하였다.

[0048] 강원지방기상청의 PCL 1300는 서쪽과 남쪽의 복잡한 산악지형으로 인하여 지리적으로 지형에코가 발생하기 쉬운 위치에 해당한다. 지형에코가 발생한 경우 윈드프로파일러의 도플러 스펙트럼에서는 DC 성분이 특정 고도에서 연속적으로 발생한다. 강원지방기상청의 PCL 1300에서는 이와 같은 특징이 뚜렷하게 나타났다.

[0049] 도 3은 저층 관측 방식에서 지상에코를 제거하기 전의 도플러 스펙트럼이고, 도 4는 고층 관측 방식에서 지상에코를 제거하기 전의 도플러 스펙트럼, 도 5는 저층 및 고층 관측 방식에서 지상에코를 제거하기 전 윈드프로파일러와 라디오존데의 바람벡터 비교도, 도 6은 저층 관측 방식에서 지상에코를 제거한 후의 도플러 스펙트럼, 도 7은 저층 관측 방식에서 지상에코를 제거한 후 윈드프로파일러와 라디오존데의 바람벡터 비교도, 도 8은 지상에코의 제거 전/후 윈드프로파일러의 RMSE 비교도, 도 9는 지상에코를 제거 전/후 윈드프로파일러와 라디오존데의 바람벡터 분포도이다.

[0050] 도 3 내지 도 9를 참조하면, 대표적으로 2013년 06월 17일 20LST에 관측된 PCL 1300의 서쪽(270°) 경사빔과 남쪽(180°) 경사빔의 도플러 스펙트럼에서는 고도 1km미만의 하층과 고도 2~4.5km의 상층에 해당하는 넓은 영역에 걸쳐서 DC 성분을 확인할 수 있다. 마주보는 경사빔의 도플러 스펙트럼은 일반적으로 청천대기에서 대칭적인 분포를 보이지만, 270° 경사빔과, 마주보는 동쪽(90°) 경사빔에서는 DC 성분이 발생하지 않았다. 270° 경사빔

의 도플러 스펙트럼은 청천대기에서 일반적으로 나타나는 정상적인 고도별 분포를 보였다. 180° 경사빔과 북쪽(360°) 경사빔은 270° 경사빔과 90° 경사빔에서 나타나는 특징과 유사하다. 270° 와 180° 경사빔에서 발생한 DC 성분은 대기 신호가 아님을 알 수 있다. 즉, 청천대기에서 마주보는 경사빔 간의 비대칭성은 DC 성분이 지형에코임을 증명하는 근거이다.

[0051] PCL 1300을 중심으로 반경 5km 이내에 해발 100m 이하의 낮은 산악지형으로 이루어져 있음에도 불구하고, 저층 관측 방식에 대한 상하층의 도플러 스펙트럼에서는 DC 성분이 발생하였다. 저층 관측 방식의 상층에서 나타난 DC 성분은 UDC(Upper DC)라고 명명하고, 하층에서 나타난 DC 성분은 LDC(Lower DC)라고 명명하였다. UDC와 LDC는 반경 5km이내에 존재하는 낮은 산악지형보다 PCL 1300의 유효 관측 고도에 해당되는 반경 밖의 높은 산악지형에 의해 발생한 것으로 판단된다. 유효 관측 고도보다 먼 거리에 있는 지형이 관측될 수 있는 이유는 전파거리 접힘 현상 때문이다. 전파거리 접힘은 WPR의 유효 관측 고도보다 높게 있는 산란체의 고도가 실제 고도보다 낮게 산출되는 것을 의미한다. 일반적으로 PRF를 길게하여 유효 관측 고도를 높게 설정함으로써 전파거리 접힘을 대비하지만, 먼 거리에서도 강한 신호를 내보내는 지형에코는 전파거리 접힘을 발생시킬 수 있다. 유효 관측 고도는 아래의 수학식 1과 같이 PRF를 통해서 계산된다. 강원지방기상청의 PCL 1300의 저층 관측 방식과 고층 관측 방식에 의한 유효 관측 고도(h_e)는 각각 9.7km와 15km이다.

[0052] **[수학식 1]**

[0053] $$h_e = \frac{c}{2PRF}$$ (c: Velocity of Light(광속))

[0054] 도 3의 270° 경사빔에서 발생한 UDC는 도 4의 고층 관측 방식에서 나타나지 않았다. 도 5는 도 3과 도 4의 사례에서 관측된 라디오존데 바람벡터와 PCL 1300의 바람벡터를 비교한 결과이다. 저층 관측 방식에서 UDC가 나타났던 고도의 PCL 1300의 동서 성분 바람벡터는 라디오존데에 비하여 과소 추정된 반면, 고층 관측 방식에서는 UDC가 사라짐으로써 라디오존데의 동서 성분 바람벡터와 일치하였다. 이 차이는 서쪽으로 반경 10km 이내의 낮은 산악지형에서 발생한 부방사부의 지형에코가 주방사부에서 관측된 대기 신호에 묻힌 것을 의미하며, 고층 관측 방식의 유효 관측 고도 15km 반경 밖의 지형에코는 전파거리 접힘 고도에서 동서 성분 벡터의 대기 신호보다 약한 것으로 추정된다. UDC는 저층 관측 방식의 유효 관측 고도, 9.7km 반경 밖에 존재하는 해발 600~1000m 이내의 산악지형에 의해 발생된 것으로 판단할 수 있으며, 전파거리 접힘의 특성에 의해 반경 약 10~15km 이내에서 발생한 2차 지형에코에 의한 신호로 판단된다. 즉, 저층 관측 방식과 고층 관측 방식에서 발생하는 DC 성분의 유무와 라디오존데를 기준으로 산출된 바람벡터의 연직 분포 차이는 DC 성분이 지형에코임을 증명하는 근거이다. 또한, 동시에 전파고도 접힘 현상에 의한 2차 지형에코의 근거이다.

[0055] 도 3의 180° 경사빔에서 발생한 UDC는 도 4의 고층 관측 방식에서도 나타난다. PCL 1300을 중심으로 반경 10km 이내에 남쪽의 지형은 서쪽보다 평탄하며, 산악지형도 적게 분포한다. 그럼에도 불구하고 고층 관측 방식에서 270° 경사빔보다 UDC가 두드러지게 발생한 이유는 동서 성분 바람벡터와 남북 성분 바람벡터의 크기 차이 때문이다. 동서 성분 바람벡터는 남북 성분 바람벡터에 비해 매우 강하기 때문에, 남북 성분 바람벡터의 브래그 산란은 동서 성분 바람벡터보다 약하다. 270° 경사빔의 강한 대기 신호에 묻혀서 나타나지 않았던 2차 지형에코는 남북 성분 바람벡터의 약한 브래그 산란에 의해 180° 경사빔의 대기 신호와 동시에 나타난 것으로 판단된다.

[0056] 90° 경사빔을 제외한 나머지 경사빔에서 LDC가 발생한 원인도 이와 유사하다. PCL 1300을 중심으로 반경 1km 이내에는 해발 30m 미만의 평탄한 지형으로 이루어져 있음에도 불구하고 LDC가 발생하였다. 고도 1km 미만의 시선속도가 약 $2 ms^{-1}$ 미만으로 낮은 경우에 약한 대기의 움직임으로 인하여 브래그 산란이 약하게 일어난다. 하층의 약한 브래그 산란으로 인하여 약화된 대기 신호는 2차 지형에코에 묻혀서 LDC가 발생한 것이다. 특히, 풍속이 급격하게 증가하는 고도 1km 부근에서는 대기 운동이 활발해지면서 시선속도 0 ms^{-1} 부근의 첨두가 사라졌다.

[0057] 청천대기에서 강릉 PCL 1300의 도플러 스펙트럼에 나타난 UDC와 LDC는 전파거리 접힘 현상에 의해 발생한 2차 지형에코로 판단되고, 이를 제거하여 PCL 1300의 정확도를 개선하였다. 도 6은 도 3의 UDC와 LDC를 제거하고 재산출된 도플러 스펙트럼이다. 가장 큰 특징은 UDC와 LDC가 모든 빔에서 제거됨으로써, 2차 지형에코에 의해 묻혀있던 대기 신호가 뚜렷하게 나타난 것이다. UDC와 LDC를 제거하기 전에 나타났던 마주보는 경사빔 간의 도플러 스펙트럼의 비대칭성은 사라지고 고도별로 대칭성이 뚜렷하게 나타났다. DC 성분을 제거한 후에 뚜렷하게

나타나는 대기 신호는 UDC와 LDC가 지형에코임을 증명하는 가장 확실한 근거이다.

[0058] 지형에코가 제거된 도플러 스펙트럼을 통해서 도 7와 같이 동서 성분 바람벡터, 남북 성분 바람벡터, 풍속 및 풍향을 산출하였고, 라디오존데의 바람벡터와 비교하였다. UDC의 고도에서 과소 추정되었던 PCL 1300의 동서 성분 바람벡터, 남북 성분 바람벡터는 지형에코의 제거로 인하여 뚜렷하게 개선되었다. 지형에코를 제거하기 전에는 동서 성분 바람벡터가 과소 추정됨에 따라 북풍 계열의 풍계가 나타났고, 최대 90° 까지 풍향의 오차가 발생하였다. 하지만, 과소 추정되었던 동서 성분 바람벡터와 남북 성분 바람벡터가 개선됨에 따라 PCL 1300의 풍향은 라디오존데와 정확하게 일치하였다. 지형에코를 제거하기 전의 풍속에 대한 RMSE(Root Mean Square Error)는 $3.6 ms^{-1}$ 이었고, 제거 후에는 $1.5 ms^{-1}$ 로 약 50% 이상 PCL 1300의 풍속이 개선되었다. LDC의 고도에서는 하층의 풍속이 $3 ms^{-1}$ 미만으로 매우 약했기 때문에 개선의 효과가 뚜렷하지 않았다.

[0059] 특정 사례를 통해 검증된 지형에코 제거를 이용한 개선 과정으로부터 라디오존데 비양 시점을 기준으로 PCL 1300에 지형 에코가 나타났던 사례를 선별하였고, PCL 1300의 개선 전과 후의 풍속에 대한 RMSE를 통해서 지형에코 제거에 따른 개선 효과를 제시하였다. 지형에코로 인하여 최대 8.3 ms^{-1} 까지 오차가 발생하였고, 개선 후에는 최대 오차가 $2.6 ms^{-1}$ 로 감소하였다. 개선 효과가 가장 크게 나타났던 사례는 86.6%의 오차 개선 효과를 보였다. 지형에코로 인한 윈드프로파일러의 풍속 오차는 실제 풍속에 비례하기 때문에 지형에코에 대한 정확한 오차 개선이 이루어진다면 윈드프로파일러의 풍속에 대한 개선 효과는 상층이 하층보다 크다.

[0060] 이와 같은 특징에 의해 PCL 1300의 오차 개선 효과는 도 8과 같이 지형에코가 상층의 넓은 고도에서 뚜렷하게 발생할수록 크게 나타났다. 도 6에서는 PCL 1300의 RMSE를 고도별로 산출하였다. 1km 이하의 하층은 지형에코가 발생했음에도 불구하고 약한 풍속에 의해 개선 전과 후의 풍속 차이가 1 ms^{-1} 미만이고, 도플러 스펙트럼에서 지형에코 외에 대기 신호도 뚜렷하게 수신되어서 PCL 1300의 개선효과가 크지 않았던 반면에 고도 3km 이상의 상층에서는 지형에코에 대한 개선 효과가 뚜렷하였다. 지형에코에 의해 12 ms^{-1} 까지 발생하였던 풍속의 오차는 지형에코의 제거에 의해 $2 ms^{-1}$ 미만으로 감소하였다. 상층의 지형에코로 인한 풍향의 오차는 약 50° 까지 발생하였지만, 지형에코의 제거에 의한 풍향의 오차는 5° 미만으로 감소하였다. 하층 풍향의 오차는 지형에코의 제거와는 무관하게 개선 전과 후의 차이가 없었다. 하층 풍향의 오차는 동서 성분 바람벡터, 남북 성분 바람벡터의 크기보다 부호에 영향을 크게 받는다. 하층 동서 성분 바람벡터와 남북 성분 바람벡터의 부호는 지표면의 영향에 의해 상층보다 시공간적인 불규칙성이 강하다. 이와 같은 특징에 의해 하층 풍속 오차는 작지만, 풍향의 오차는 크게 나타난다. 또한 PCL 1300의 풍속이 과대 추정된 경우는 지형에코에 의한 영향이 아니기 때문에 개선된 결과를 보이지 않았다.

[0061] 결과적으로, PCL 1300의 풍속은 68.4% 개선되었고, 라디오존데 풍속과의 상관성은 0.58에서 0.97로 향상되었다. 도 9의 (a)에서 개선 전의 PCL 1300의 풍속은 $15 ms^{-1}$ 미만에서 라디오존데의 풍속과 선형적인 분포를 보였다. $15\sim25 ms^{-1}$ 의 풍속에서는 지형에코에 의해 과소 추정되었지만, 도 9의 (b)에서는 지형에코 제거를 통해 라디오존데의 풍속과 일치하게 되었다. PCL 1300의 동서 성분 바람벡터는 69.4% 개선되었고, 라디오존데와의 상관성은 0.62에서 0.98로 향상되었다. PCL 1300의 동서 성분 바람벡터는 풍속과 유사한 특징을 보였다. 12 ms^{-1} 미만의 크기에서는 라디오존데와 선형적인 분포를 보이다가 $12\sim25 ms^{-1}$ 의 크기에서 과소 추정되었다. 지형에코 제거를 통해서 동서 성분 바람벡터에 대한 PCL 1300의 과소 추정은 뚜렷하게 개선되었다. PCL 1300의 남북 성분 바람벡터는 32.2% 개선되었고, 라디오존데와의 상관성은 0.85에서 0.94로 향상되었다. PCL 1300의 남북 성분 바람벡터는 동서 성분 바람벡터에 비하여 벡터의 크기가 작아서 개선 효과는 낮았다.

[0062] 본 연구 결과를 통해 강원지방기상청 PCL 1300의 하드웨어 관측 정확도는 오차 약 2.0 ms^{-1} 미만으로 높은 것으로 판단된다. 개선 전에 발생한 약한 $6.0 ms^{-1}$ 의 관측 오차는 윈드프로파일러의 하드웨어 오차로 판단하기 어렵다. 신호처리 단계에서 지형에코에 의한 자료의 오염에 의해 상층의 바람벡터가 과소 추정되었기 때문이다. PCL 1300이 대기 신호를 수신하지 못한 것이 아니라 지형에코를 대기 신호로 오인한 것이 원인이다. 즉, PCL 1300의

하드웨어 관측 정확도를 객관적으로 평가하기 위해서는 지형에코와 같은 환경적인 요인이 제거된 대기 신호를 사용해야 하며, 수치모델 혹은 악기상 관측 등에 올바르게 활용되기 위해서는 신호처리 과정이 필요하다.

[0063] 이상에서는 도면 및 실시예를 참조하여 설명하였지만, 해당 기술 분야의 숙련된 당업자는 하기의 특허청구범위에 기재된 본 발명의 기술적 사상으로부터 벗어나지 않는 범위 내에서 본 발명을 다양하게 수정 및 변경시킬 수 있음을 이해할 수 있을 것이다.

부호의 설명

[0064] 100 : 도플러 스펙트럼 수집 모듈

200 : 지상 에코 제거 모듈

210 : 분석점 결정 모듈

220 : 분석점 제거 모듈

230 : 보간 모듈

300 : 신호 결정 모듈

400 : 속도 측정 모듈

500 : 계산 모듈

S1 : 도플러 스펙트럽 수집 단계

S2 : 지상 에코 제거 단계

S2-1 : 분석점 결정 단계

S2-2 : 분석점 제거 단계

S2-3 : 보간 단계

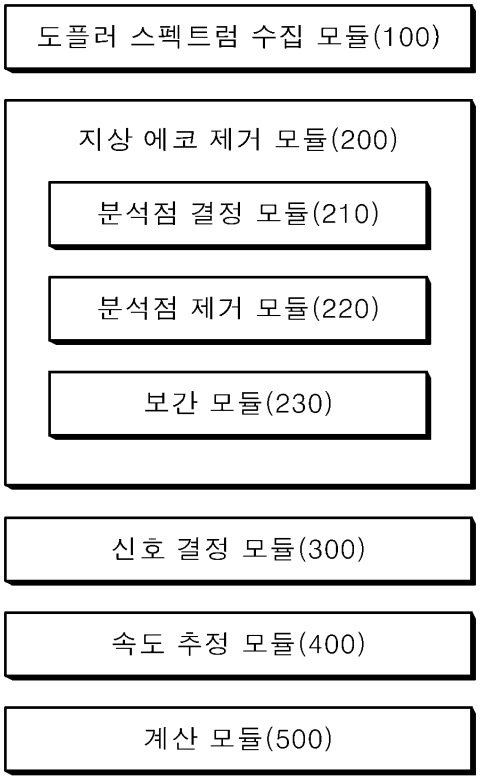
S3 : 신호 결정 단계

S4 : 속도 추정 단계

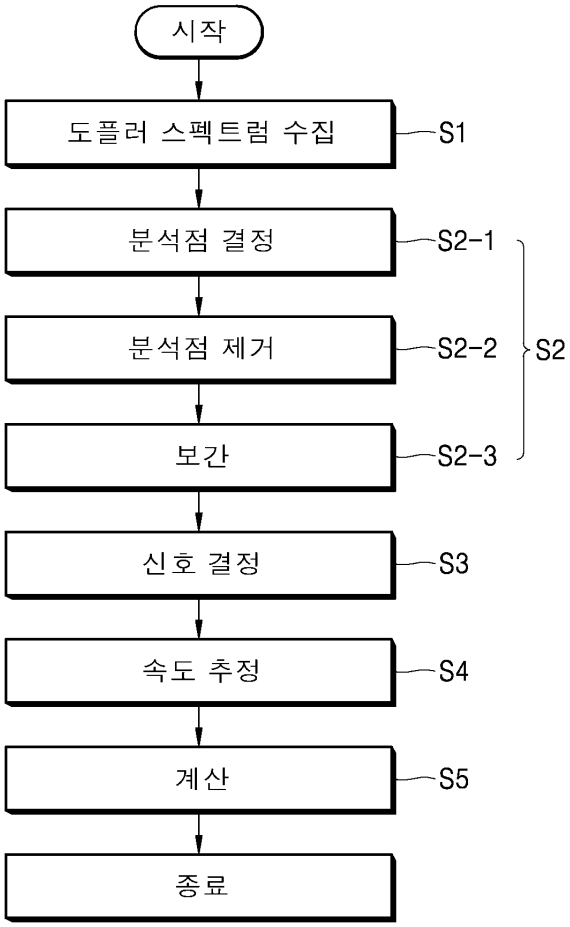
S5 : 계산 단계

도면

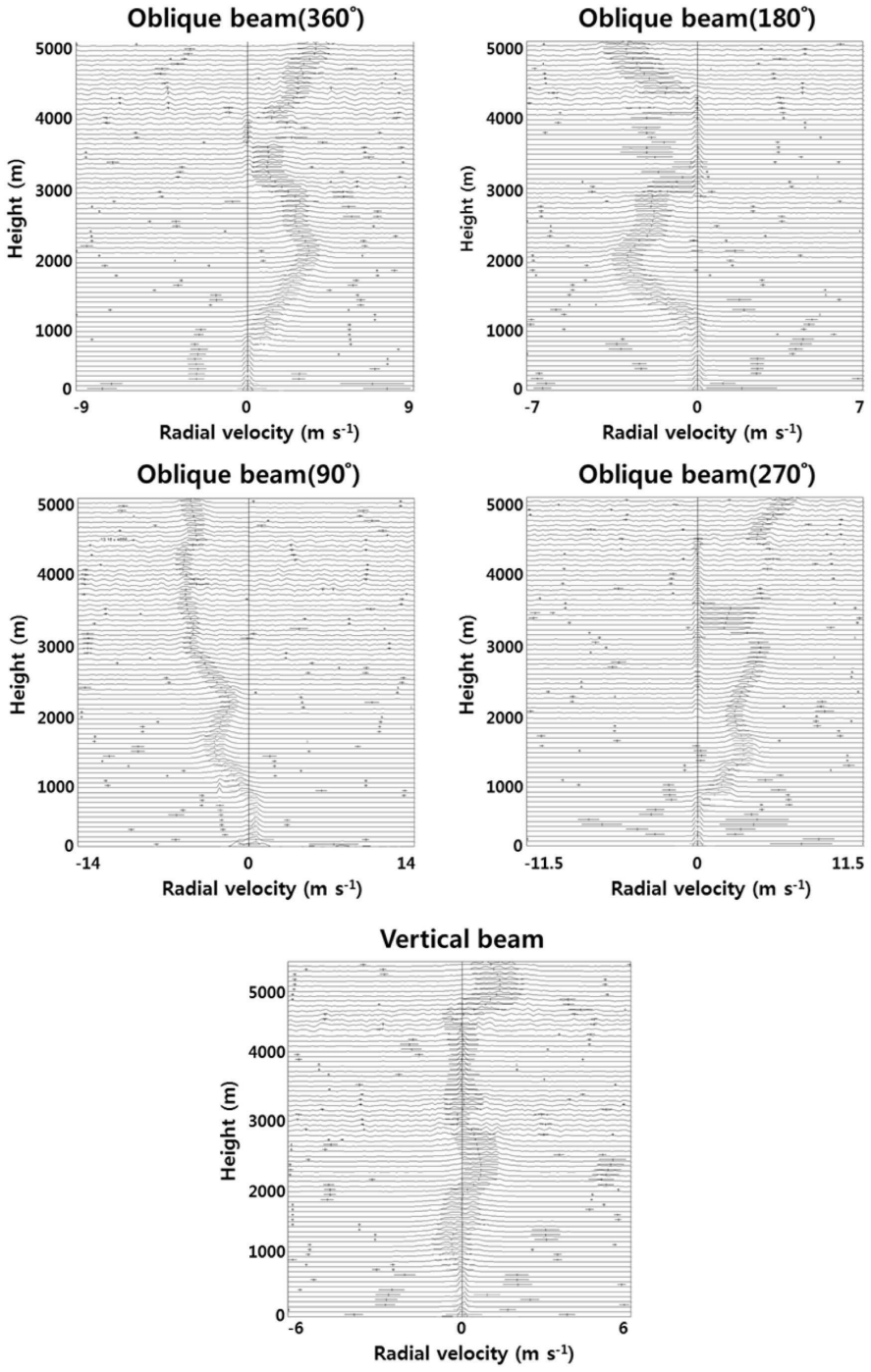
도면1


도플러 스펙트럼 수집 모듈(100)
지상 에코 제거 모듈(200)
분석점 결정 모듈(210)
분석점 제거 모듈(220)
보간 모듈(230)
신호 결정 모듈(300)
속도 추정 모듈(400)
계산 모듈(500)

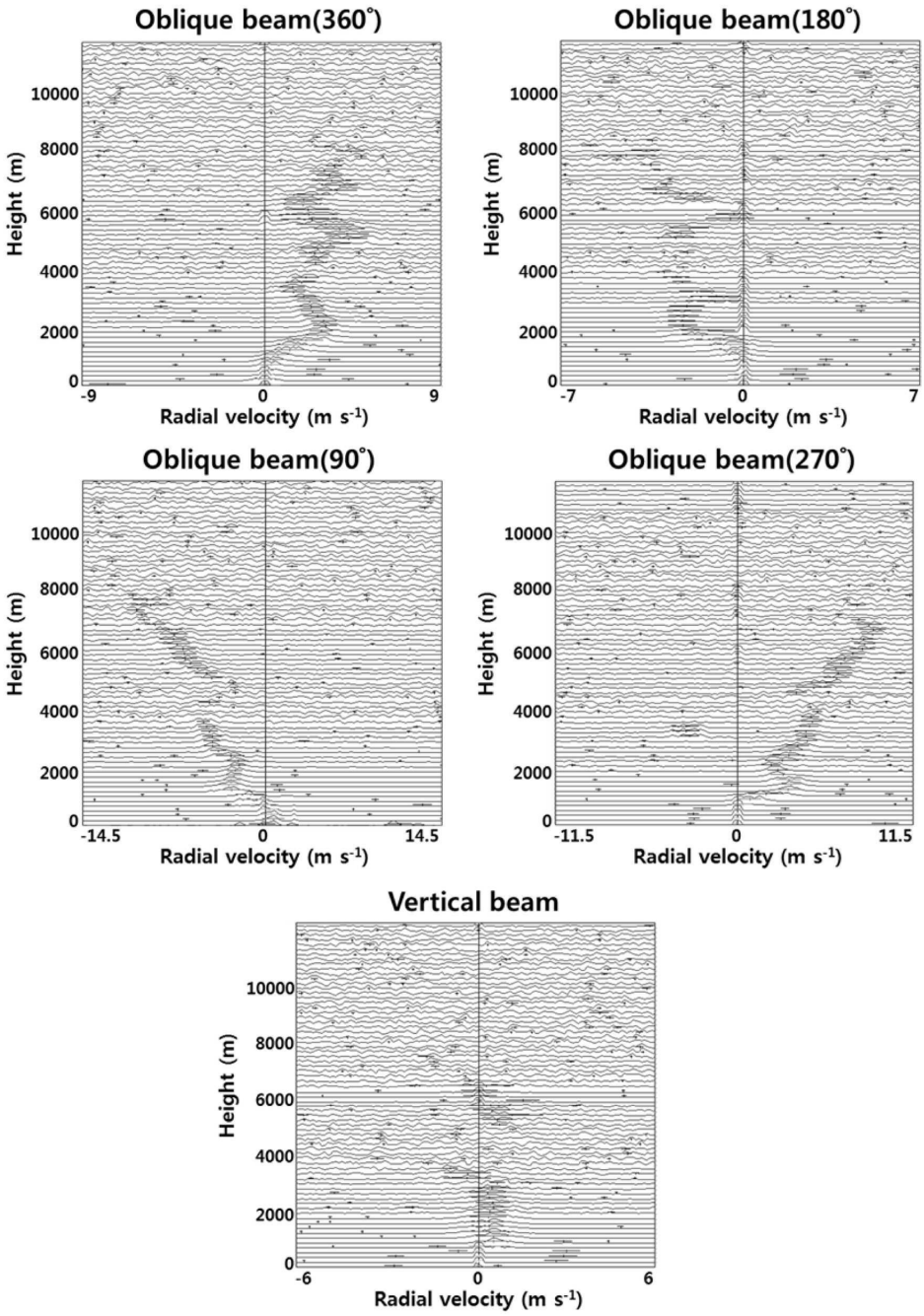
도면2


시작
도플러 스펙트럼 수집
S1
분석점 결정
S2-1
분석점 제거
S2-2
S2
보간
S2-3
신호 결정
S3
속도 추정
S4
계산
S5
종료

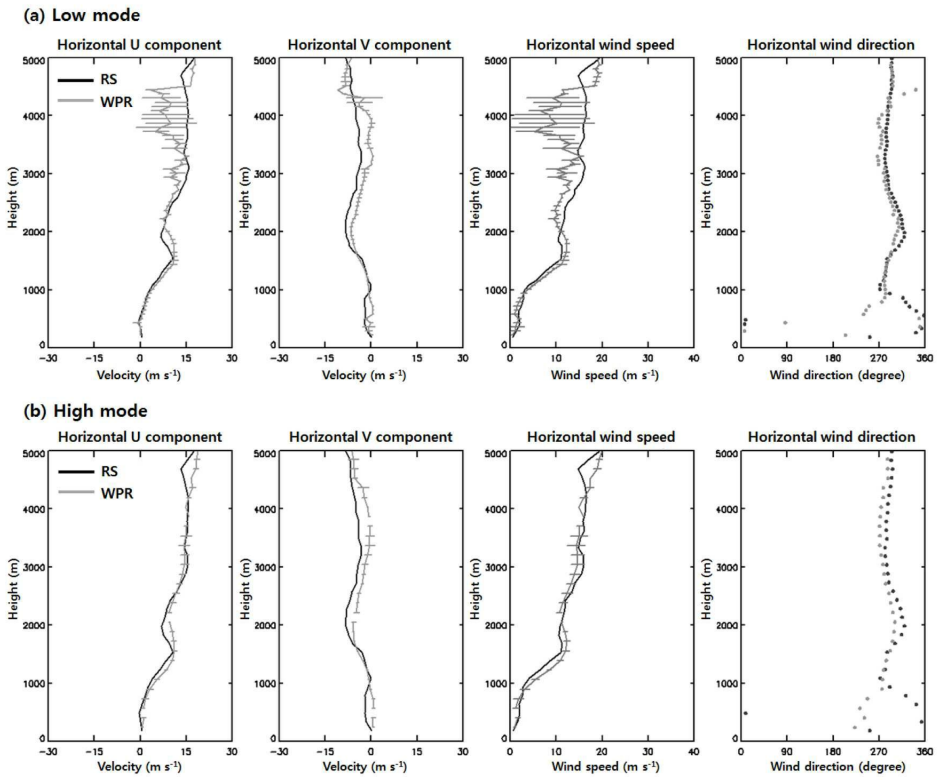
도면3


Oblique beam(360°)
Oblique beam(180°)
Oblique beam(90°)
Oblique beam(270°)
Vertical beam
Height (m)
Radial velocity (m s-1)
5000
4000
3000
2000
1000
0
-9
9
-7
7
-14
14
-11.5
11.5
-6
6

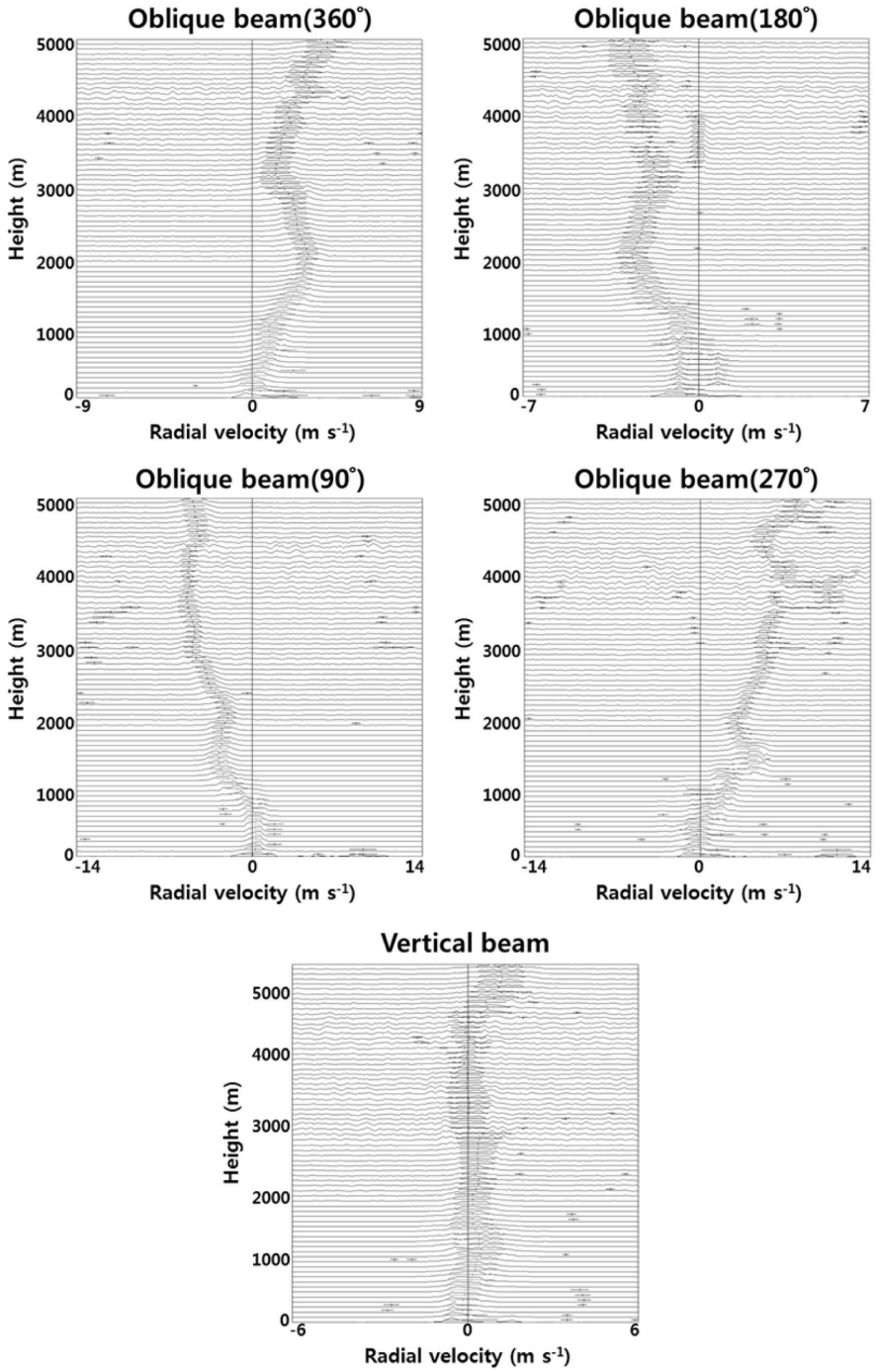
도면4


Oblique beam(360°)
Oblique beam(180°)
Oblique beam(90°)
Oblique beam(270°)
Vertical beam
Height (m)
Radial velocity (m s-1)
0
2000
4000
6000
8000
10000
-9
9
-7
7
-14.5
14.5
-11.5
11.5
-6
6

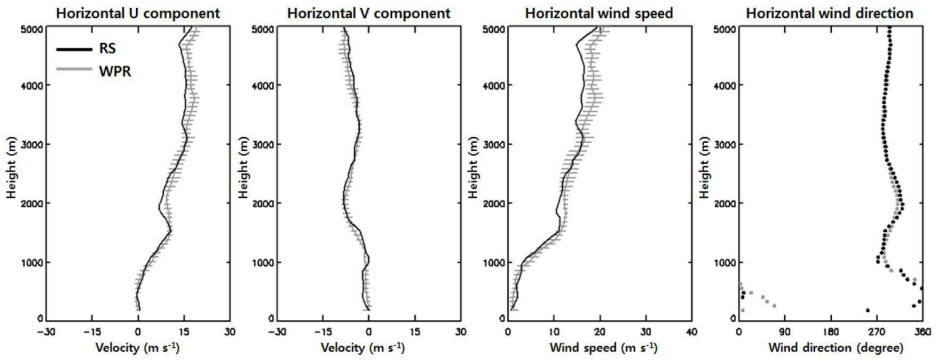
도면5


(a) Low mode
Horizontal U component
Horizontal V component
Horizontal wind speed
Horizontal wind direction
RS
WPR
Height (m)
Velocity (m s-1)
Wind speed (m s-1)
Wind direction (degree)
(b) High mode
Horizontal U component
Horizontal V component
Horizontal wind speed
Horizontal wind direction
RS
WPR
Height (m)
Velocity (m s-1)
Wind speed (m s-1)
Wind direction (degree)

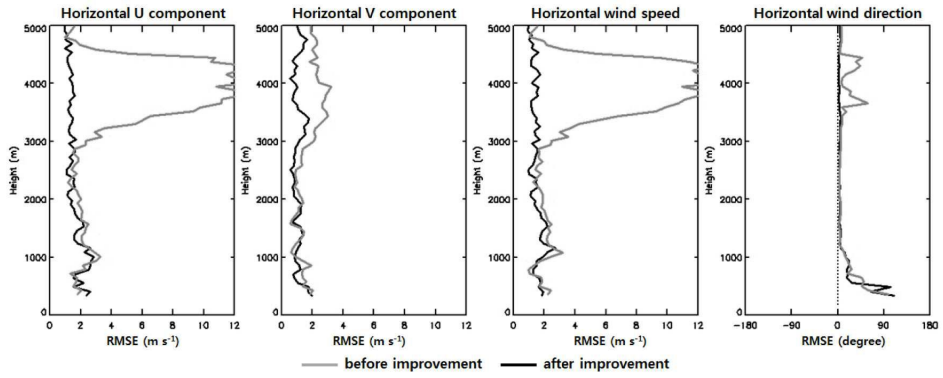
도면6


Oblique beam(360°)
Oblique beam(180°)
Oblique beam(90°)
Oblique beam(270°)
Vertical beam
Height (m)
Radial velocity (m s-1)
5000
4000
3000
2000
1000
0
-9
9
-7
7
-14
14
-6
6

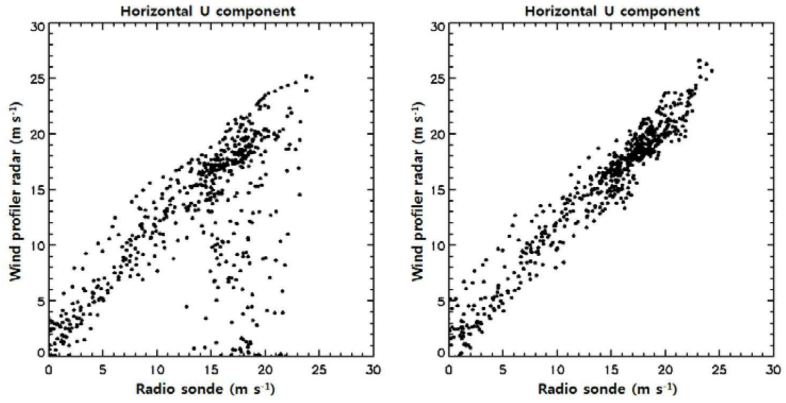
도면7


Horizontal U component
Horizontal V component
Horizontal wind speed
Horizontal wind direction
RS
WPR
Height (m)
Velocity (m s-1)
Wind speed (m s-1)
Wind direction (degree)

도면8


Horizontal U component
Horizontal V component
Horizontal wind speed
Horizontal wind direction
Height (m)
RMSE (m s-1)
RMSE (degree)
before improvement
after improvement

도면9


Horizontal U component
Horizontal U component
Wind profiler radar (m s-1)
Radio sonde (m s-1)