가우시언 빔 전송 이론을 이용한 빔 결합 특성 해석

An Analysis on the Properties of Beam Coupling by Using Gaussian Beam Propagation Theory

한석태 · 강지만 · 이정원 · 제도흥 · 정문희 · 김수연 · 위석오

Seog-Tae Han · Jinman Kang · Jeong-Won Lee · Do-Hyung Je ·
Moon-Hee Jung · Soo-Yeon Kim · Seog-Oh Wi

요 약

본 논문에서는 밀리미터파 수신 시스템의 준광학계 회로에서 발생하는 3가지 빔 결합 손실에 대하여 가우시언 빔 전송 이론을 기반으로 심도 있게 검토하였다. 첫째, 준광학 시스템에 의하여 형성된 각각의 빔 허리와 그들의 위치가 서로 일치되지 않았을 때 발생하는 빔 결합 손실에 대하여 분석하였다. 빔 허리의 크기를 3λ 이상으로 설계하면 빔 광축 방향에 대한 빔 허리 크기와 그 위치의 불일치에 의한 빔 결합 손실을 최소화 시킬 수 있다. 둘째, 준광학 회로에서 서로 다른 두 빔 축의 기울어짐과 각도상의 비정렬에 의한 빔 결합 손실을 해석하였다. 기울기 각도와 정렬에 의한 빔 결합 손실을 고려할 때 빔 허리의 크기가 작을수록 유리함을 알 수 있다. 마지막으로 광축 방향에 대하여 측면 방향으로 하나의 광축이 치우쳐 있는 경우의 결합 손실을 검토하였다. 치우침을 감안한 설계 빔의 반경은 최소한 3λ 이상이 되도록 설계되어야 한다.

Abstract

In this paper, three kinds of beam coupling losses which occur in a quasi-optics circuit for millimeter wave receiver system have been intensively investigated. First, the beam coupling losses which are caused by mismatch of beam waists radii and their positions between those of one and the other have been evaluated. It shows that beam coupling losses due to mismatch of beam waists radii and their positions between two quasi-optics circuits can be minimized if beam waist radius is chosen as larger than 3 times the operation wavelength. Second, the beam coupling losses have been studied when the axis of propagation of one beam is tilted with respect to that of the other beam. It is noted that smaller beam waist radius results in greater tolerance to tilts and angular misalignments. Third, the beam coupling cases in which two beams are offset if their axes of propagation are parallel but one is displaced relative to the other have been investigated. It is confirmed that beam waists radii with larger than 3 times operation wavelength are less sensitive to lateral offsets.

Key words : Gaussian Beam, Beam Coupling Loss, Beam Alignment, Beam Tilt, Beam Offset

I. 서 론

실제적인 가우시언(Gaussian) 빔(beam) 전송 이론을 기반으로 한 밀리미터파 및 서브 밀리미터파 대

역 준광학계 설계에 있어서 하나의 준광학 시스템에 의하여 형성된 가우시언 빔이 또 다른 준광학 시스템으로 전달될 때 두 준광학 시스템 사이의 가우시언 빔 결합 특성을 검토하는 것은 매우 중요하다.

한국천문연구원(Korea Astronomy and Space Science Institute)

· 논문 번호 : 20100927-140

· 교신저자 : 한석태(e-mail : sthan@kasi.re.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 11월 8일

특히 밀리미터파 수신 준광학 시스템에서 널리 사용되고 있는 타원 면경이나 유전체 렌즈는 물론이고 휘드 혼(feed horn)에 의하여 형성된 가우시언 빔이 또 다른 준광학 회로에 전달될 때 가우시언 빔의 결합 문제가 대두된다.

가우시언 빔 준광학 회로 시스템에서 빔의 특성을 결정하는 두 가지 요소인 빔 반경과 빔 곡률 반경이 서로 일치되지 않아서 발생하는 소위 빔 비정합(mismatch)의 함수로 주어지는 두 준광학 시스템 사이의 빔 결합 손실은 전체 준광학 시스템의 성능을 결정하게 된다.

또, 하나의 준광학 시스템에서 검토되어야 할 사항으로는 준광학 시스템을 구성하는 각종 준광학 소자들 간의 정렬과 부품들의 제작상의 문제를 들 수 있다.

이들 두 가지 문제는 준광학 시스템의 완벽하지 못한 빔 결합을 야기시키며, 이는 실제적으로 빔 결합 손실이 발생하는 원인이 발생되며, 이 문제는 준광학 시스템을 제작할 때 피할 수 없이 발생하는 문제이다.

따라서 서로 다른 준광학 부품들의 제작 및 조립에 대한 허용 요차는 물론이고, 각 부품들의 준광학 특성의 허용 범위를 설정하는 것은 실제적인 준광학 설계에 있어서 반드시 검토되어야 할 사항이다. 밀리미터파 및 서브 밀리미터파와 카세그레인 안테나에 의하여 형성된 가우시언 빔과 수신기의 준광학 회로에 의하여 형성된 두 준광학 시스템 사이의 빔 결합 특성과 손실에 대하여 수식적만 해석하였다^{[1]~[3]}. 그러나 실제적인 준광학 회로 설계를 고려한 주파수에 따른 빔 결합 손실과 빔 허리의 크기에 따른 결합 손실은 심도 있게 검토되지 않았다. 또한, 한국우주전파관측망에 활용되는 수신기 시스템은 22 GHz, 43 GHz, 86 GHz와 129 GHz 대역의 우주 전파를 동시에 관측할 수 있도록 매우 복잡한 준광학계 회로로 구성되어 있다^{[4],[5]}.

따라서 본 논문에서는 준광학계 설계 및 제작할 때 발생하는 실제적인 문제점과 한국우주전파관측망 수신 시스템에 활용되는 준광학계 회로의 빔 결합 손실에 대하여 심도 있게 분석하고자 한다.

준광학 시스템이 각각의 광축에 서로 잘 일치되어 있다고 하더라도 두 준광학 시스템에 의하여 형

성된 각각의 빔 허리와 그들의 위치가 서로 일치되지 않았을 때 발생하는 빔 결합 손실에 대하여 분석한다. 또한, 비록 두 개의 준광학 시스템의 빔 반경과 빔 곡률 반경이 서로 일치되어 있다고 하더라도 각각의 빔 축이 일치되지 않았을 경우와 빔 축에 대하여 어느 정도 각도로 틀어짐에 의한 빔 결합 손실에 대하여 자세히 분석하기로 한다.

II. 가우시언 빔 결합의 제 문제

2-1 가우시언 빔(Gaussian Beam) 이론

일반적인 Helmholtz 방정식으로부터 진행 방향에 대한 전자기장의 크기의 변화가 주어진 파장 내에서 매우 작고, 진행 방향에 대한 크기의 변화도 수직 방향의 변화에 비해 작다고 가정하면 paraxial 파동 방정식으로 주어진다. 이 방정식을 직각좌표계를 도입하며 계산하면 해는 Hermite polynomial로 주어지며, 기본 차수에 대한 식은 진행 방향에 대한 가우시언 복사 특성으로 표현되며, 이 식으로부터 빔 반경과 빔 곡률 반경에 대한 식을 얻을 수 있다^[3].

가우시언 빔의 반경(beam radius) $W(z)$ 는 진행되는 방향 z 축에 수직인 장의 세기의 변화를 의미하는 것으로서, 가우시언 형태를 갖는 장의 세기로부터 $1/e$ 되는 지점의 빔 반경을 나타내는 변수가 되어 식 (1)과 같이 표현된다.

또한 그 크기가 최소가 되는 빔 반경을 W_0 로 나타내며, 빔 허리(beam waist)라고 부른다.

$$W(z) = W_0 \left[1 + \left(\frac{\lambda z}{\pi W_0^2} \right)^2 \right]^{0.5} \quad (1)$$

빔 허리 부근에서의 빔의 파면은 평면이 되지만, 빔 허리로부터 충분히 떨어진 거리에서의 파면은 구면파가 된다. 이 구면파는 빔의 곡률 반경(radius of curvature) $R(z)$ 로 나타내며 다음과 같다.

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{\pi W_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right] \quad (2)$$

그림 1에서 제시한 바와 같이 빔 허리로부터 전송된 가우시언 빔은 전송 거리에 따라 빔이 점점 확산되는데, 빔의 확산 각(growth angle)은 다음 식으로 주어진다.

그림 1. 가우시안 빔 파라미터와 전파 특성

Fig. 1. Beam parameters of Gaussian beam and its propagation properties.

그림 2. 두 개의 빔 허리 크기와 위치의 불일치

Fig. 2. Axially aligned two beams with offset waists.

$$\theta = \frac{\lambda}{\pi W_0} \quad (3)$$

가우시안 빔의 전송 특성을 나타내는 식 (1)과 식 (2)는 준광학계 설계에 있어서 가장 기본이 되는 식들이다.

2-2 빔 축 방향으로 빔 허리(Beam Waist) 크기와 위치의 어긋남에 의한 빔 결합 손실

그림 2에 보인 바와 같이 이론적으로 계산하여 설계된 준광학계 회로의 빔을 beam 1이라 하고 그의 빔 허리 크기가 W_{oa} 이며, 실제로 제작하여 구성된 준광학계 회로의 빔을 beam 2이며, 그의 빔 허리 크기가 W_{ob} 라고 하자. 이론적인 계산에 의하여 설계된 준광학 회로의 빔 허리(W_{oa}) 크기와 실제적으로 제작되어 구성된 준광학 회로에 의하여 형성된 빔 허리(W_{ob}) 크기와 위치가 서로 일치하는 경우에 가장 이상적으로 준광학 회로가 구성되었다고 한다.

그러나 준광학 회로를 구성하는 타원면경 혹은 유전체 렌즈와 컬러게이트 휘드 혼에 의하여 형성된 빔 허리들은 제작상의 공정도와 치수의 불일치로 인하여 이론적으로 설계된 빔 허리 크기와 그 위치를 서로 완벽하게 일치하는 것은 매우 어렵다.

두 준광학계 회로의 빔 허리 크기와 그들의 위치가 서로 일치되지 않았을 경우는 다음 식으로 빔 결합 손실이 주어진다^[3].

$$K_{ax} = \frac{4}{(W_{ob}/W_{oa} + W_{oa}/W_{ob})^2 + (\lambda \Delta z / \pi W_{oa} \cdot W_{ob})^2} \quad (4)$$

빔 허리 크기는 사용하고자 하는 파장으로 0.5λ , 1λ 와 3λ 씩 각각 정규화 하였고, 두 빔 허리 크기의 비(W_{oa}/W_{ob})에 따른 빔 허리 위치 차이(Δz)에 대한 계산된 빔 결합 손실은 그림 3(a), 그림 3(b)와 그림 3(c)에 각각 제시하였다.

카세그레인 초점에 형성된 빔 허리의 크기는 주파수에 비례한다^[6]. 따라서 주파수에 상관없이 같은 결과를 얻게 되므로 여기서는 129 GHz를 대상으로 계산하여 제시하였다. 예상한대로 두 빔 허리 크기와 그 위치가 서로 일치할 때 최대의 결합이 됨을 알 수 있다.

두 빔의 빔 허리 위치 차이(Δz)를 최대 8λ 까지 변화시켜 본 결과, 주어진 빔 허리의 크기가 작을수록 빔 허리 위치 차이가 클수록 급격히 결합 손실이 나빠지고, 빔 허리가 클수록 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 이는 W_{oa} 가 커지면 식 (4)에서 분모의 첫 번째 항이 지배적이므로 빔 허리 위치 차이(Δz)에 상관없이 두 빔 허리 크기의 비(W_{oa}/W_{ob})에 따라 결합 손실이 결정되기 때문이다.

따라서 실제로 준광학 회로를 설계할 때 빔 허리의 크기를 3λ 이상으로 설계하면 빔 광축 방향에 대한 빔 허리 크기와 그 위치의 불일치에 의한 빔 결합 손실을 최소화시킬 수 있다.

2-3 주어진 빔 축 방향에 대한 상대적 빔 축 기울어짐에 의한 빔 결합 손실

제작된 준광학 회로의 구성 부품 즉 타원 면경이나 휘드 혼 및 유전체 렌즈 등이 원래 설계된 빔 축에 설치되지 않고 실수 또는 설치 오차에 의하여 그

(a) $0.5 \lambda @ 129 \text{ GHz}$

(b) $\lambda @ 129 \text{ GHz}$

(c) $3 \lambda @ 129 \text{ GHz}$

그림 3. 빔 허리 크기와 그 위치의 불일치에 의한 빔 결합 손실

Fig. 3. Beam coupling losses due to axially aligned two beams with offset waists.

그림 4. 두 빔 축 방향이 상대적으로 기울어져 있는 경우

Fig. 4. The propagation axes of one beam is tilted with respect to that of the other beam.

림 4와 같이 빔 축으로부터 상대적으로 일정한 각으로 빔 축이 기울어져 설치되는 경우가 있다. 이 경우의 빔 결합 손실은 다음과 같이 주어진다^[3].

$$K_{tilot} = \exp \left[-2 \left(\frac{\theta}{\theta_t} \right)^2 \right] \quad (5)$$

여기서

$$\theta_t = \frac{\lambda}{\pi} \left[\frac{(1/w_a^2 + 1/w_b^2)^2 + (\pi/\lambda)^2 (1/R_a - 1/R_b)^2}{1/w_a^2 + 1/w_b^2} \right]^{0.5} \quad (6)$$

임의의 거리 Δz 에서의 빔 기울러짐에 대한 빔 결합 손실은 그 지점의 빔 반경(w_a, w_b)과 곡률 반경(R_a, R_b)으로 계산된다. 만약 빔의 기울러짐 현상이 빔 허리에서 발생하는 경우에는 다음과 같은 식으로 주어진다.

$$\theta_{twaist} = \frac{\lambda}{\pi} \left(\frac{1}{w_{oa}^2} + \frac{1}{w_{ob}^2} \right)^{0.5} \quad (7)$$

우선 129 GHz 신호를 수신하기 위하여 준광학계를 설계한다고 가정했을 경우, 빔 허리 크기는 설계하고자 하는 신호 파장으로 $0.5 \lambda, 1 \lambda$ 와 3λ 씩 정규화된 빔 허리의 크기와 빔 축에 대한 상대적인 기울기 각에 따른 빔 결합 손실을 그림 5(a), 그림 5(b)와 그림 5(c)에 각각 제시하였다. 그림에 제시한 바와 같이 주어진 빔 허리의 비(w_{oa}/w_{ob})에 따라 129 GHz 대역 빔 허리가 클수록 기울기 각에 따라 급격히 빔 결합 손실이 증가됨을 알 수 있다. 기울기 각도와 22 GHz, 43 GHz, 86 GHz 및 129 GHz 대역의 주파수 변화에 따른 빔 결합 손실도 계산하여 그림

그림 5. 주어진 빔 허리의 크기와 빔 축에 대한 상대적인 기울기 각에 따른 빔 결합 손실

Fig. 5. Beam coupling losses with changing tilt angle and given beam waist radii.

6(a), 그림 6(b), 그림 6(c) 및 그림 6(d)에 각각 제시하였다. 식 (3)에 제시한 바와 같이 빔 허리의 크기가 작을수록 보다 큰 빔 확산 각을 갖게 된다. 또한, 빔 허리(W_{0a})의 크기는 파장에 비례하게 되므로 주파수가 높을수록 빔 허리의 크기가 작아지게 되어 기울기각에 대한 빔 결합 손실이 완만하게 감소됨을 알 수 있다. 따라서 그림 6(a), (b), (c), (d)에 나타난 바와 같이 각 주파수 대역에 따라 수치적으로 확인해 보면 주파수가 높을수록 낮은 주파수에 비하여 빔 허리의 크기가 작아지므로 큰 기울기 각에서도 양호한 빔 결합 손실 특성을 보이고 있다. 바깥의 실선에서 안쪽의 이점쇄선은 두 빔의 허리 크기 비인 W_{0a}/W_{0b} 의 값을 최대 4에서 0.71까지 변화시켜 기울기 각도에 따라 결합계수를 보여주고 있다. 빔 결합 손실은 빔 허리가 작아질수록 기울기 각에 따라 덜 민감하게 반응하는 것을 알 수 있으며, 빔 허리가 커질수록 빔의 기울기 각도 틀어짐에 의한 빔 결합 손실도 급격하게 증가된다.

따라서 기울기 각도에 의한 빔 결합 손실을 고려할 때 빔 허리의 크기가 작을수록 유리함을 알 수 있다.

2.4 두 빔의 진행축이 서로 일치하지 않은 경우의 빔 결합 손실

그림 7에 제시한 바와 같이 제작된 준광학 회로의 구성 부품 즉 타원 면경이나 유전체 렌즈와 휘드 혼 등이 원래 설계된 빔 축에 정렬되어 설치되지 않고, 실수 또는 설치 오차에 의하여 빔 축에 대하여 서로 상대적으로 측면 방향으로 치우쳐 설치되는 경우가 있다. 이 경우의 빔 결합 손실은 다음과 같이 주어진다^[3].

$$K_{offset} = \exp \left[-2 \left(\frac{\Delta d}{\delta_{off}} \right)^2 \right] \quad (8)$$

여기서

$$\delta_{off} = \left[\frac{(W_{0a}^2 + W_{0b}^2)^2 + (\lambda \Delta z / \pi)^2}{W_{0a}^2 + W_{0b}^2} \right]^{0.5} \quad (9)$$

만약 두 빔의 빔 허리가 서로 일치된 경우는 다음과 같이 간단한 식으로 주어진다.

$$\delta_{off} = (W_{0a}^2 + W_{0b}^2)^{0.5} \quad (10)$$

그림 6. 기울기 각도와 주파수 변화에 따른 빔 결합 손실

Fig. 6. Beam coupling losses as a function tilt angles and given frequencies.

그림 7. 두 빔 축이 서로 평행하지만 일치하지 않는 경우

Fig. 7. Two beam's axes of propagation are parallel, but one is displaced relative to the other.

식 (10)은 두 빔의 허리 반지름을 제곱 합하여 제공 함하여 제 공급한 것이므로 직관적인 예상을 해 보았을 때, 더

큰 빔 허리 반지름을 갖는 빔이 축 방향으로의 치우침에서 덜 민감한 것을 알 수 있다. 그러므로 축 방향 치우침 변수는 더 큰 빔 허리를 갖는 빔에 지배적이라 할 수 있다.

그림 8(a)~(c)와 같이 129 GHz에서 설계된 빔의 반경을 0.5λ , 1λ 와 3λ 에 대하여 계산해 본 결과, 빔 허리 반경이 작을수록 치우침의 정도에 따라 매우 급격히 빔 결합 손실이 나빠짐을 알 수 있다. 여기서 거리(Δz)는 원래의 빔 허리(W_{oa})로부터 또 하나의 빔 허리(W_{ob})까지의 거리를 의미하며, $Z_c = \pi W_o^2/\lambda$ 는 confocal 거리를 나타낸다.

그림에서 보인 바와 같이 동일한 129 GHz 대역에서도 빔 허리의 크기가 클수록 축 방향 치우침에 따

그림 8. 빔 축 치우침에 의한 빔 결합 손실
Fig. 8. Beam coupling losses due to lateral offset of two beam's axes of propagation.

라 빔 결합 손실이 완만하게 감소함을 알 수 있다. 따라서 준광학 설계를 할 때 빔 허리의 크기가 클수록 유리함을 알 수 있다. 그림 9(a)~(d)에서 보는 바와 같이 22 GHz, 43 GHz, 86 GHz와 129 GHz 대역의 각 주파수별 결과를 검토해 보면 치우침(Δd) 정도가 클수록 빔 결합 손실이 급격히 나빠지는데 비해, 오히려 또 하나의 빔 허리(W_{ob})가 원래의 빔 허리(W_{oa})로부터 멀어질수록 동일한 치우침에 비해 결합 손실이 다소 완만하게 감소함을 알 수 있다. 이는 상대적으로 서로의 빔 허리로부터 멀어질수록 빔 반경이 커져 식 (9)에 나타난 바와 같이 빔 허리(W_{ob})이 지배적이어서 빔 결합 손실이 적어지게 된다. 또한 22 GHz, 43 GHz, 86 GHz와 129 GHz 대역 주파수에 대한 설계된 빔 반경을 3λ 라고 가정하고 결합 손실을 검토해 본 결과, 주파수 높아질수록 빔 반경이 작아지게 되어 광축 치우침에 대한 빔 결합 손실이 심각해짐을 알 수 있다.

따라서 치우침을 감안한 설계 빔의 반경은 최소한 3 이상이 되도록 설계되어야 한다.

III. 결 론

준광학계 설계 및 제작할 때 발생하는 실제적인 문제점과 한국우주전파관측망 수신 시스템에 활용되는 준광학계 회로의 빔 결합 손실에 대하여 가우시언 빔 전송 이론을 기반으로 심도 있게 해석하였다.

준광학 시스템이 각각의 광축에 서로 잘 일치되어 있다고 하더라도 두 준광학 시스템에 의하여 형성된 각각의 빔 허리와 그들의 위치가 서로 일치되지 않았을 때 발생하는 빔 결합 손실에 대하여 분석하였다.

그 결과, 빔 허리 크기와 그 위치의 불일치에 의한 빔 결합 손실은 빔 허리 크기가 3λ 이상이 되면 빔 허리 위치의 어긋남에 의한 영향은 거의 없고 다만 두 빔 허리 크기의 비가 1.5 이하로 준광학계를 설계하면 약 90 % 이상의 빔 결합 특성을 얻을 수 있다.

또한 비록 두 개의 준광학 시스템의 빔 반경과 그들의 위치가 서로 일치되어 있다고 하더라도 각각의 빔 축의 기울어짐에 의한 빔 결합 손실을 해석하였다. 그 결과, 빔 결합 손실은 빔 허리가 작아질수록

그림 9. 빔 축 치우침과 주파수 변화에 따른 빔 결합 손실

Fig. 9. Beam coupling losses due to lateral offset of two beam's axes of propagation with given frequencies.

기울기 각에 따라 덜 민감하게 반응하는 것을 알 수 있으며, 빔 허리가 커질수록 빔의 기울기 각도 틀어짐에 의한 빔 결합 손실도 급격하게 증가된다.

따라서 기울기 각도에 의한 빔 결합 손실을 고려할 때 빔 허리의 크기가 작을수록 유리함을 알 수 있다.

마지막으로 광축 방향에 대하여 측면 방향으로 하나의 광축이 치우쳐 있는 경우의 결합 손실을 검토해 본 결과, 주파수 높아질수록 빔 반경이 작아지게 되어 광축 치우침에 대한 빔 결합 손실이 심각해짐을 알 수 있다. 따라서 치우침을 감안한 설계 빔의 반경은 최소한 3λ 이상이 되도록 설계되어야 한다.

본 논문의 분석을 이용하여 밀리미터파 및 서브 밀리미터파 준광학 회로를 설계하면 준광학 시스템에서 발생하는 빔 결합 손실이 최소화된 최적의 준광학 시스템을 얻을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] W. B. Joyce, B. C. DeLoach, "Alignment of Gaussian beams", *Applied Optics*, vol. 23, no. 23, pp. 4187-4196, Dec. 1984.
- [2] Salvatore Solimeno, Antonello Cutolo, "Coupling coefficients of mismatched and misaligned Gauss-Hermite and Gauss-Laguerre beams", *Optics Letters*.

- ter, vol. 11, no. 3, pp. 141-143, Mar. 1986.
- [3] Paul F. Goldsmith, *Quasioptical Systems*, IEEE Press, 1998.
- [4] Seog-Tae Han, Jung-Woon Lee, and Jiman Kang, "Millimeter-wave receiver optics for Korean VLBI network", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 29, no. 1, Jan. 2008.

- [5] Jong-Ae Park, Seog-Tae Han, "A quasioptical system of the dual channel SIS receiver for TRA0 telescope", *International Journal of Infrared and Millimeter Waves*, vol. 20, no. 10, Oct. 1999.
- [6] 손태호, 김용훈, 김기채, 한석태, 전자파공학응용공학, 홍릉과학출판사, 2008.

한 석 태

1979년 2월: 한양대학교 무선통신공학과 (공학사)
1986년 8월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학석사)
1996년 8월: 충남대학교 전자공학과 (공학박사)
1987년 3월~1989년 3월: 미국 Massachusetts 주립대학 천체물리학과 객원연구원

2008년 1월~2008년 12월: 한국전자과학회 학술위원장
1989년 12월~현재: 한국천문연구원 책임연구원, 기술개발연구본부장

[주 관심분야] mm/sub-mm 파 우주전파수신기 개발, Quasioptics 설계 및 제작

이 정 원

1996년 2월: 서울대학교 천문학과 (이학사)
1998년 2월: 서울대학교 천문학과 (이학석사)
2008년 8월: 서울대학교 지구환경과학부 천문학 전공 (이학박사)
2008년 9월~현재: 한국천문연구원 위촉선임연구원

[주 관심분야] 전파 천문학용 mm/sub-mm 파 수신기 개발, mm/sub-mm 파 초전도 믹서 설계, 전파 천문학

강 지 만

2007년 8월: 서울대학교 물리천문학부 천문전공 (이학사)
2007년 9월~현재: 서울대학교 물리천문학부 천문전공 석사과정
2005년 12월~현재: 한국천문연구원 연구원

[주 관심분야] 준광학계, 전파천문학

학

제 도 홍

1992년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
2002년 6월~현재: 한국천문연구원 선임연구원

[주 관심분야] 우주전파 수신 시스템, 안테나, 초고주파 부품 등

정 문 희

1990년: 서울대학교 천문학과 (이학사)
1993년: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)
2000년: 프랑스 Paris 6 대학 천체물리 및 관측기기 (이학박사)
1993년~1995년: 대우전자 영상연

구소 연구원

2001년~현재: 한국천문연구원 선임연구원

[주 관심분야] SIS 믹서, 밀리미터파 능동, 수동 소자 및 수신기 시스템

위 석 오

1992년 2월: 전남대학교 전기공학과 (공학사)
1995년 2월: 전남대학교 전기공학과 (공학석사)
2002년 8월: 전남대학교 전기공학과 (공학박사)
2003년 3월 1일~현재: 한국천문연

구원

[주 관심분야] 전파망원경제어, 제어계측, 전력전자

김 수 연

2007년 2월: 고려대학교 전기전자전파공학과 (공학사)
2009년 2월: 고려대학교 전자전기공학부 (공학석사)
2009년 3월~현재: 한국천문연구원 위축기술연구원
[주 관심분야] mm파 우주전파수신

기 위상 측정