이동체 서비스를 위한 위상 배열 안테나 기술

윤 영 중/연세대학교

□차 례□

Ⅰ. 서 론
Ⅱ. 선형 위상 배열 안테나 이론
Ⅲ. 평면 배열 안테나(Planar Array Antennas) 이론
Ⅳ. 다층 마이크로스트립 안테나 기술
Ⅴ. 능동 집적 안테나(Active Integrated Antennas) 기술
Ⅵ. 결 론

Ⅰ. 서 론

위성통신에 대한 관심이 날로 높아지고 이동통신에 대한 수요가 급증함에 따라 최근에는 저궤도 위성을 이용한 이동통신 서비스에 대한 국내 사업자들의 참여가 추진 중에 있다. 따라서 앞으로 위성을 이용한 이동체에서의 통신 및 방송용 소형 단말기가 일반화될 전망이며, 이에 따라 이동체에서 사용될 고효율, 고이득 특성을 지닌 소형, 박형, 경량의 위성통신 및 방송 수신용 안테나에 대한 연구 개발이 절실히 필요하다고 하겠다. 외국에서는 이미 평판안테나에 대한 개발이 상당히 진행되어 일부 상용화 단계에 있으나, 국내에서는 이 분야에 대한 연구가 미흡한 실정이다.

이동체에서 위성으로부터 신호를 수신하기 위하여 매우 높은 지향성과 고이득의 안테나가 필요하며, 이동체의 움직임에 따른 빔의 이동이 이뤄져야 하므로 평판구조의 마이크로스트립 배열안테나가 가장 적합한 형태가 될 수 있다. 위상배열 안테나는 소자수가 증가함에 따라 이를 조절하기 위한 급전선로와 위상변위기의 수가 늘어 복잡해지므로 안테나의 크기도 커지게 된다. 이러한 크기 증가를 최소화하기 위하여 최근에는 급전회로와 안테나 방사소자 간의 간섭을 최소화하고 크기도 줄인 다층 마이크로스트립 배열안테나에 관한 연구[1, 2]와 능동소자를 이용한 위상변위기와 같은 소자를 동일 기판상에 설계하는 능동 집적안테나 기술에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.[3, 4, 5]

따라서, 본고에서는 일반적인 선형 위상배열 안테나 이론 및 평면 배열 안테나 이론에 대해 간략히 기술하고, 마이크로스트립 안테나의 단점인 저효율, 협대역 특성을 보완할 수 있는 다층구조의 마이크로스트립 안테나 기술과 능동소자를 사용하여 집적화, 소형화, 고효율화 시킨 능동집적 안테나 기술에 대하여 소개하고자 한다.

Ⅱ. 선형 위상 배열 안테나 이론

일반적인 배열 안테나에 대한 해석은 안테나를 하나의 등방성 점원 (isotropic point source)으로 가정하여 이의 배열에 따른 방사특성을 고찰한

다. 각 안테나 소자가 비등방성인 경우에는 등방성 점원의 배열성분(array factor)과 단일 안테나 소자의 방사패턴 (element pattern)의 곱, 즉 패턴적의 원리를 적용하여 전체 방사패턴을 결정하게 된다.

그림 1과 같이 N개의 등방성 안테나가 균일한 간격 d로 배열되어 있다면 E는

$$E = \sum_{n=0}^{N-1} I_n e^{jn\Psi} \tag{1}$$

로 표시되며, I_n은 각 소자에 가해진 전류의 크기이고, Ψ는 배열 안테나 소자간의 간격 d 때문에 생기는 위상차와 각 소자에 가해진 전류 신호 간의 위상차 α와의 합이다.

$$\Psi = kd\sin\theta + \alpha \tag{2}$$

여기서 k는 전파상수이다. 이때, 각 소자의 전류 크기가 일정하면, 식 (1)은 최대값으로 정규화하여 다음과 같이 된다.

$$E = \frac{\sin\frac{N\Psi}{2}}{N\sin(\frac{\Psi}{2})} \tag{3}$$

식 (3)을 N개의 등간격 배열 안테나에 대한 정규화된 배열성분(normalized array factor)이라 하며, 배열 소자수에 따른 패턴을 그림 2에 나타냈다. 그림에서 보듯이 주로브의 폭은 $4\pi/N$이고, 부로브의 폭은 $2\pi/N$이 되며, N이 증가하면 주로브의 폭은 좁아지고, 부로브의 수 ($N-2$개)는 증가하며, 부로브레벨(SLL)은 감소한다.

배열성분의 최대값은 그림 2에서 보듯이 $\Psi = 0$ 일 때이므로, 식 (2)로부터 각 소자간의 위상차가 없을 때는($\alpha = 0$) 최대빔의 방향이 $\theta = 0$ 방향이 되며, 이를 broadside 배열이라 한다. 여기에 각 소자 간의 균일한 위상차 ($\alpha \neq 0$)를 주게 되면, 최대빔의 방향은

$$\theta_m = \sin^{-1}(-\frac{\alpha}{kd}) \tag{4}$$

가 된다. 즉 원하는 각도 θ_0로 빔을 주사시키기 위해서는 각 소자에

$$\alpha = -kd\sin\theta_0 \tag{5}$$

의 위상차를 주어야 한다. 이때 주로브의 3-dB 빔폭은 근사적으로

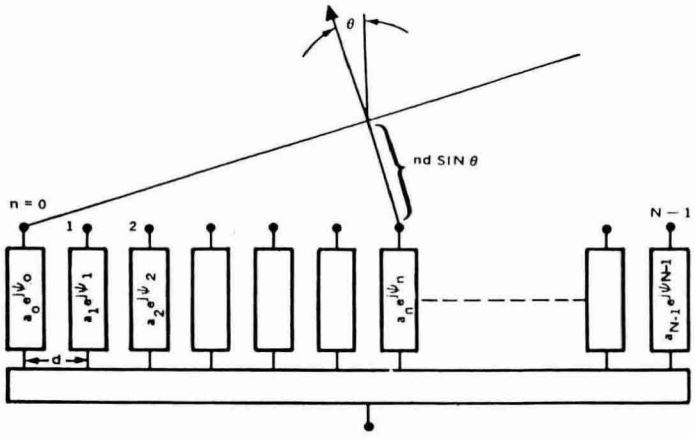

그림 1. 등방성 점원의 등간격 배열에 따른 far-field geometry

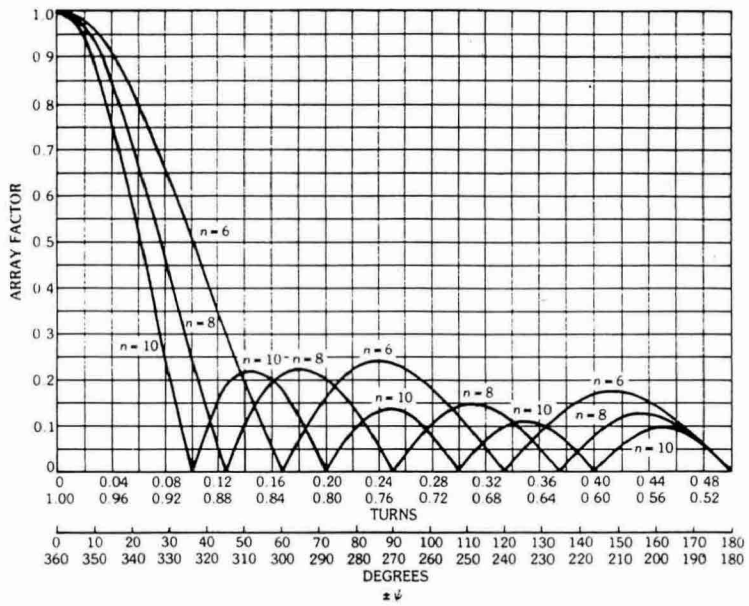

그림 2. 등간격 선형 배열 안테나의 정규화된 배열 성분

$$\theta_{3-\mathrm{dB}} = \sin^{-1}\left[\frac{\lambda}{2\pi d}\left(-\alpha \pm \frac{2.782}{N}\right)\right] \qquad (6)$$

로 표시되며, 부로브레벨은 N이 매우 큰 경우 최대 −13.46dB가 된다.[6]

각 안테나 소자에 가해지는 전류의 크기가 균일하지 않은 경우에도 주빔의 방향이나 형태는 변하지 않지만 부로브의 방사 패턴은 변하게 된다. 특히 전류크기의 분포를 중심으로부터 점차 완만하게 감소시키면 부로브레벨은 감소하게 되며, 각 소자의 분포가 binomial distribution을 이루면 부로브레벨은 0(영)이 된다. 또한 모든 부로브의 크기를 균일하게 낮은 값으로 유지시키려면 소자의 전류크기가 Chebyshev 분포를 이루도록 하면 된다.

위상배열 안테나의 가장 큰 장점은 앞서 설명한 바와 같이 각 소자에 가해지는 전류의 크기와 위상차를 조절함으로서 빔의 형태와 주사 방향을 원하는 대로 바꿀 수가 있으며, 특히 주사방향을 바꿀때는 기계적인 움직임이 없이 전기적으로 빠르고 불연속적인 방향 전환이 가능하다. 이때 배열 소자간의 간격 d는 주빔의 방향을 결정하는데 중요한 요소가 되며, 특히 $d > \lambda$인 경우에는 안테나의 가시영역내에 $\left(-\frac{\pi}{2} < \theta < \frac{\pi}{2}\right)$ 원하지 않은 방향에 주빔과 같은 크기의 그레이팅로브(grating lobe)가 생기게 된다. 만약 간격 d가 $\frac{\lambda}{2}$보다 작으면 가시영역내에서 그레이팅로브가 생기지 않는다. 따라서 위상배열 안테나로 빔을 θ_0까지 주사시킬 경우, 가시영역 내에 그레이팅로브가 생기지 않으려면 안테나 소자 간의 간격은 다음 조건을 만족해야 한다.[7]

$$\frac{d}{\lambda} < \frac{1}{1 + |\sin\eta_0|} \qquad (7)$$

반면, 안테나 소자간의 간격이 너무 좁으면 그레이팅로브는 생기지 않지만, 소자 간의 상호 결합으로 인하여 안테나 방사패턴 왜곡의 원인이 된다. 따라서 일반적으로는 배열 안테나의 소자 간격을 $\frac{\lambda}{2} < d < \lambda$로 하여 주어진 주사 각도내에서 그레이팅로브가 생기지 않도록 한다.

Ⅲ. 평면 배열 안테나 (Planar Array Antennas) 이론

위성으로부터 통신 또는 방송 신호를 수신하기 위한 안테나는 가격이 저렴하고 제작이 쉬워야 하며, 쉽게 설치 조작할 수 있어야 하고, 벽이나 지붕위에 평면으로 설치할 수 있다면 더욱 바람직하다. 더구나 위성으로부터 또는 저궤도위성과 같이 이동중인 위성으로부터 신호를 받으려면 안테나의 빔을 2차원적으로 주사시킬 수 있어야 한다. 따라서, 선형 배열안테나처럼 안테나 소자를 1차원 선상에 배열하게 되면 배열축 방향에 대해서는 좁은 빔 폭과 빔의 주사 특성을 얻을 수 있으나 횡방향에 대해서는 단일 소자의 넓은 방사 패턴을 그대로 유지하게 되므로, 배열 소자를 2차원의 평면상에 사각형 또는 원형으로 배열하므로써 2차원적인 배열성분을 얻을 수 있다.

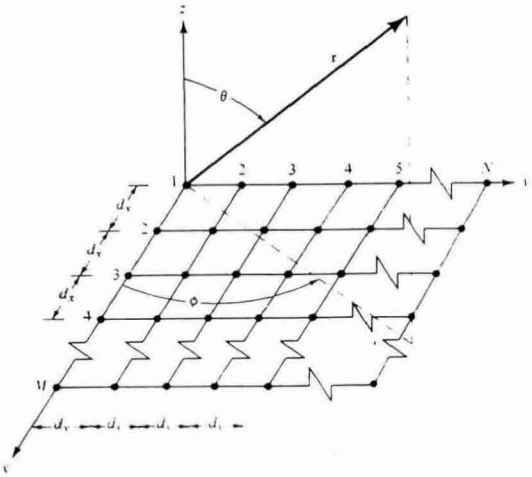

그림 3. 평면 배열 안테나(Gcomctry of planar array antcnna)

그림 3과 같이 등방성 점원이 xy 평면상에 x축과 y축으로 각각 d_x, d_y의 간격로 균일하게 2차원으로 분포되어 있다면, 전체 배열 성분은 x축으로의 배열 성분과 y축으로의 배열성분에 대한 곱으로 나타난다.

$$\mathrm{AF} = \sum_{m=1}^{M} I_m e^{j(m-1)(kd_x\sin\theta\cos\phi+\beta_x)} \cdot \sum_{n=1}^{N} I_n e^{j(n-1)(kd_y\sin\theta\sin\phi+\beta_y)} \quad (8)$$

여기서 I_m과 I_n은 각각 x축과 y축에 놓인 안테나 소자의 전류 크기이며, β_x, β_y는 각 축방향으로의 인접한 안테나 소자간의 위상차이다. 이때 모든 소자의 전류 크기가 같다면 식(8)은 최대값으로 정규화되어 다음 식과 같이 된다.

$$\mathrm{AF}_n(\theta,\phi) = \left(\frac{\sin(\frac{M\Psi_x}{2})}{M\sin(\frac{\Psi_x}{2})}\right)\cdot\left(\frac{\sin(\frac{M\Psi_x}{2})}{M\sin(\frac{\Psi_x}{2})}\right) \quad (9)$$

여기서 $\Psi_x = kd_x\sin\theta\cos\phi + \beta_x$, $\Psi_y = kd_y\sin\theta\sin\phi + \beta_y$이며, 또한 β_x와 β_y는 각각 $\beta_x = -kd_x\sin\theta_0 \cdot \cos\phi_0$, $\beta_y = -kd_y\sin\theta_0 \cdot \sin\phi_0$이고 $(\theta = \theta_0, \phi = \phi_0)$가 주빔의 방향이다. 선형배열 안테나와 마찬가지로 d_x와 d_y는 모두 λ보다 작게하여 원하는 주사방향에서 그레이팅로브가 생기지 않도록 해야 한다. 이 경우 그레이팅로브가 생기는 위치는

$$\phi = \tan^{-1}\left[\frac{\sin\theta_0\sin\phi_0 \pm n\lambda/d_y}{\sin\theta_0\cos\phi_0 \pm n\lambda/d_x}\right] \quad (10)$$

$$\theta = \sin^{-1}\left[\frac{\sin\theta_0\cos\phi_0 \pm m\lambda/d_x}{\cos\phi}\right] = \sin^{-1}\left[\frac{\sin\theta_0\sin\phi_0 \pm n\lambda/d_y}{\sin\phi}\right] \quad (11)$$

으로 m과 n은 양의 정수이며, m = n = 0일 때가 주빔의 위치가 된다.

안테나 소자를 반경 a의 원형 도선위에 균일한 간격으로 배열한 원형 배열안테나도 2차원의 배열성분을 얻을 수 있으며, 주로 전파방향탐지, 항공 또는 천문 항해장비, sonar 및 레이다 등에 많이 사용된다.

이러한 평면배열 안테나는 소자수가 증가함에

따라 위상변위기 및 급전선로가 매우 복잡해지는 단점이 있으나, 고이득의 원추형 빔으로 전방향에 대한 주사능력을 지니며, 낮은 부로브레벨과 좁은 빔폭을 얻을 수 있어 안테나의 효율을 높일 수 있다.

Ⅳ. 다층 마이크로스트립 안테나 기술

최근의 안테나 기술은 위성통신 또는 이동통신 분야로부터 레이다, 미사일 등 군사용 장비에 이르기까지 모두 우수한 성능을 지니면서 동시에 소형, 경량, 저렴한 제작단가, 제작의 용이성 등을 설계조건으로 내세우고 있다. 이러한 요구사항을 만족하기 위하여 가장 많이 사용되는 것이 마이크로스트립 안테나이다. 마이크로스트립 안테나는 얇은 유전체의 양면에 매우 얇은 도체가 입혀진 마이크로스트립 기판의 한쪽 도체면에 안테나 방사 소자와 신호를 급전시키기 위한 급전선로가 동시에 photoetching 기법으로 제작되고, 다른 한면은 접지면으로 사용한 것으로 매우 얇고, 소형, 경량의 안테나로 평면구조물에 특히 많이 사용된다. 반면 방사손실에 따른 저효율과 수%의 좁은 대역폭이 단점이다.

안테나 방사소자는 사각형, 원형, 타원형 등 원하는 형태로 제작이 가능하며, 이에 대한 급전은 마이크로스트립 선로에 의한 직접 급전 방식외에 동축케이블, 결합선로, 슬롯 등을 이용한 급전방식도 사용되고 있다. 특히 최대 전력을 방사하기 위한 급전선로와 방사소자간의 정합회로나 위상변위기 등을 안테나 소자와 일체화 할 경우 회로가 복잡해지고 급전부의 기생 방사등으로 인한 방사패턴의 왜곡이 생기게 된다.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 최근에는 급전선로와 방사소자를 서로 다른 기판에 인쇄하고 이 둘을 슬롯을 이용하여 전자기적으로 결합하는 슬롯결합형 다층 마이크로스트립 안테나에 관한 연구가 많이 진행되고 있다.[1, 2, 8] 그림 4에 슬롯결합형 다층 마이크로스트립 안테나의 구조를 나타냈다. 그림에서 보듯이 가운데 접지면을 가진 세층의 유전체 기판으로 구성되어 있으며, 접지면 아래의 기판에는 마이크로스트립 급전선로가 인쇄되어 있고, 위의 기판에는 방사소자가 인쇄되어 있으며, 적층소자의 유무에 따라 기생 방사소자가 그 위에 인쇄되며, 접지면에 있는 공진 크기보다 작은 슬롯을 통하여 방사소자와 급전선이 결합되는 구조로 되어 있다. 슬롯에 의해 접지면 아래 방향으로 약간의 전력이 방사되지만, 슬롯은 공진 크기보다 작기 때문에 방사소자에 의한 전력에 비하여 통상 20dB이하의 값을 갖는다. 이 경우, 슬롯이 있는 접지판에 의해 구분되는 급전부와 방사소자 간에는 전자기적 간섭이 적게 되므로 다층구조의 장점을 최대한 살릴 수 있다. 또한 안테나와 마이크로파 소자가 혼합되어 있는 경우도 급전부와 방사부가 독립되어 있으므로 기판의 선택, 회로의 구성 면에서 매우 유용하다. 즉, 이러한 구조는 급전부에는 유전율이 높으면서 얇은 기판을 사용하고, 안테나부는 방사효율을 최대화하기 위하여 유전율이 낮은 두꺼운 기판을 사용하는 것이 가능하므로 급전부와 안테나부를 각각 독립적으로 최적 설계할 수 있다.[9] 또한 접지면은 급전부로부터의 기생방사를 막아주므로 안테나 패턴과 편파 특성이 매우 우수하며, 효율을 최대화할 수 있고, 서로 다른 공진 주파수를 지닌 안테나 방사 소자를 여러층 쌓음으로서 넓은 주파수 대역 특성을 나타낼 수 있으며[10], 배열안테나에 적용하는 경우 평면 배열 안테나를 쉽게 구성할 수 있다. 안테나와 급전선로를 결합시켜 주는 슬롯의 크기 및 위치, 각도 등을 조정하면 안테나로 여기되는 신호의 크기 및 임피던스 특성, 편파 특성을 조절할 수 있으므로 특히 배열 안테나의 경우 원하는 빔 패턴을 만드는데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

이러한 슬롯결합형 다층 마이크로스트립 안테나는 기존의 마이크로스트립 안테나의 해석방법으로 많이 쓰이고 있는 전송선로모델(transmission line model)이나 공진기 모델(cavity model)과 같

은 근사식으로는 해석이 불가능하므로 모멘트법[1]이나 최근 많이 연구되고 있는 FDTD (finite-difference time-domain)[11]와 같은 정확한 수치해석 방법을 사용해야 한다. 전자는 주파수 영역(spectral domain)에서, 후자는 시간 영역(time domain)에서의 전파해석(full-wave analysis)를 한 것으로 원하는 영역에서의 정확한 해석이 가능하나, 많은 계산 시간을 요하는 단점이 있다. 최근에는 이러한 긴 계산 시간을 줄이기 위한 많은 연구가 진행되고 있다.

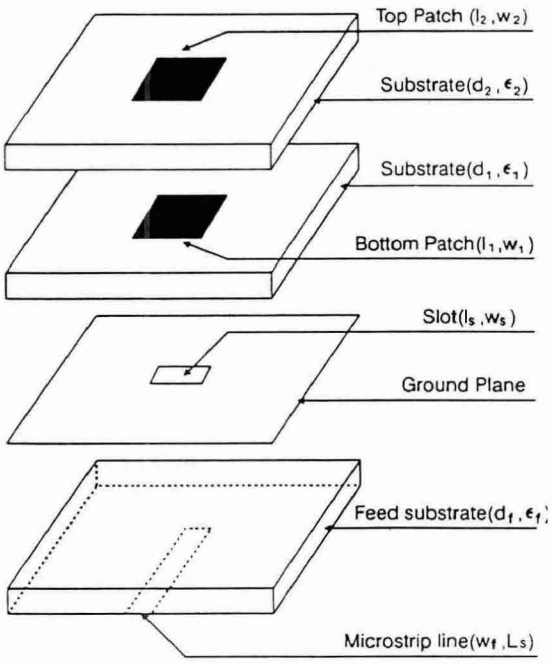

그림 4. 슬롯결합형 다층 마이크로스트립 안테나의 구조

V. 능동 집적 안테나 (Active Integrated Antennas) 기술

일반적으로 능동안테나(active antenna)란 안테나의 성능을 향상시키기 위해서 수동안테나(passive antenna)에 능동소자(active device)를 이용하는 것을 말하는 반면에, 능동 집적 안테나(active integrated antenna)란 능동안테나보다는 보다 기술적으로 수동 안테나 소자와 능동 회로를 같은 성질의 매질위에 집적화한 것이다. MIC 기술과 MMIC기술의 발전과 함께 최근 능동집적안테나에 대한 관심이 늘어가고 있다.

능동안테나의 사용은 일찌기 1928년부터 시작되었으며 당시 1MHz정도의 주파수를 사용하는 방송수신기 등으로 널리 이용되었었다. 1960년대 이후부터는 높은 주파수에서 사용할 수 있는 트랜지스터가 개발되면서 능동안테나에 대한 관심이 늘어났으며 이때 여러가지 혁신적인 연구들이 진행되어 왔다. 수동방사소자에 능동소자를 부가하는 것은 여러가지 면에서 장점이 있는데 예를 들면 짧은 안테나(short antenna)의 유효길이를 증가시켜 주며, 대역폭의 증가, 배열안테나의 경우 상호 결합도의 감소, 잡음요소를 개선해주는 장점이 있다. 이러한 장점들은 안테나의 성능을 향상시켜 주었으며 당시 능동안테나에 대한 연구도 보다 활성화되었다.[3]

1980년대와 1990년대에는 quasi-optical 기술의 발전과 더불어 능동집적안테나에 대한 연구가 계속 진행되었다. 동작주파수가 증가함에 따라서 소자들에 대해 요구되는 전력은 감소하게 되어서 quasi-optical 기술을 이용한 밀리미터파 대역에서의 소자들의 전력결합문제가 대두되었다. quasi-optical 전력결합을 위해서는 두가지 방법이 있다. 첫째로 능동안테나에 의한 접근방법이 있으며, 둘째는 grid 접근방법이 있다. 능동안테나 접근방법의 예로는 부분적인 전력 결합을 위해서 주기적인 구조를 갖는 결합공진기 배열을 사용하는 것이 있다. 그리고 grid 접근방법은 높은 전력에 응용하기에 적합한 방법이다. Grid 배열은 안테나의 배열소자가 대단히 짧고, 배열소자간의 간격이 파장보다 훨씬 좁은 능동집적안테나의 특별한 경우이다. 그리고 상호결합도가 대단히 강해서 TEM 도파관모드를 이용해서 해석되어야 한다. 이것이 두 방법의 가장 큰 차이점이다. 이 방

법에서 각각의 단위셀은 무한 grid위에 평면파가 입사된다는 가정하에서 설계된다. 그러므로 grid 접근방법은 높은 전력을 다루게 되는 큰 배열에 적합한 방법이다. 한편 능동안테나에서의 각 단위셀에 대한 설계는 능동안테나 소자 각각이 자체적으로 잘 동작할 수 있도록 독립적으로 설계된다. 그리고 이 각각의 소자들이 부분적인 전력결합을 위해서 배열화된다.

능동집적안테나는 용도에 따라 송신용과 수신용으로 분류할 수 있으며, 송수신을 모두 할 수 있는 형태로는 transceiver, transponder, repeater등이 있다. 이때 증폭기는 종류에 따라 안테나 소자의 입력 또는 출력단에 각각 붙이게 되며 이 외의 능동 소자 들을 첨가하여 주로 위상 변위(phase shifting), 발진(oscillating), 증폭(amplifying), 또는 주파수 변환 (frequency converting) 등의 역할을 하도록 한다. 그 한 예로 그림 5에 4x4 FET oscillator 타입의 배열 안테나 구조를 나타냈다[4]. 특히 배열 안테나의 경우에는 위상변위기를 FET 또는 PIN diode 등과 같은 능동소자로 구성하게 된다. 따라서 그림 6과 같이 앞서 설명한 다층 마이크로스트립 구조를 이용한 안테나를 설계하면 안테나 방사소자와 복잡한 급전회로간의 분리를 통해 초소형의 고효율, 고이득 안테나를 제작할 수 있다.

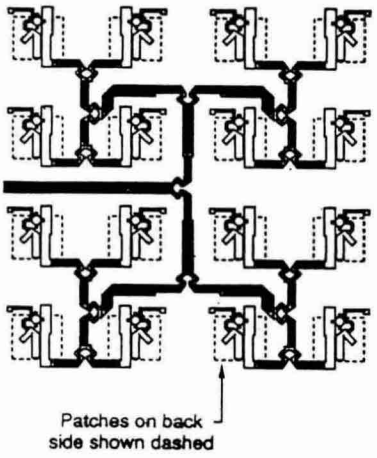

그림 5. 4x4 FET oscillator 배열 안테나

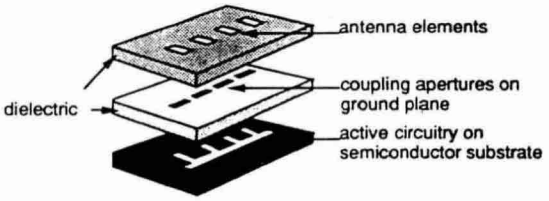

그림 6. 다층구조를 지닌 능동 집적 배열 안테나의 개념도

Ⅵ. 결 론

이상에서 위상배열안테나에 대한 일반적인 이론과 실제 응용 방향으로 평면 배열안테나, 다층 마이크로스트립 안테나 및 능동집적안테나 기술 등에 관하여 개략적으로 살펴보았다. 이러한 위상배열 안테나를 최적으로 설계하기 위하여는 앞서 설명된 바와 같이 안테나 소자의 형태, 배열구조, 각 소자 여기 신호 간의 크기 및 위상 등의 최적설계가 필요하며, 이 외에도 입출력 단의 임피던스정합, 안테나의 편파특성, 허용전력 등이 고려되어야 한다. 그리고 안테나가 사용되는 주변환경(기후, 설치위치, 사용목적)과 제작가격 등도 고려되어야 한다.

앞으로 무궁화 위성이 발사되고, 위성통신 서비스가 본격화되면, 위성을 이용하여 이동체에서 통신 및 방송을 수신하고자 하며, 이 때 소형, 박형, 고효율, 경량의 평면구조 안테나가 부착된 소형 단말기가 일반화 될 전망이다. 특히 평면안테나로 많이 사용되는 마이크로스트립 안테나의 효율을 높이고, 고이득을 지니며, 빔의 주사능력을 갖도록 하기 위해 능동소자를 급전선로와 동일 기판상에 설계하고, 이를 안테나 방사 소자와 분리시켜 다층구조의 마이크로스트립 능동 집적 배열안테나가 적합하다. 따라서 국내에서도 이 분야에 대한 연구개발이 절실히 필요하다고 하겠다.

참 고 문 헌

1. D. M. Pozar, "Analysis of an infinite phased array of aperture coupled microstrip patches," IEEE Trans. Antenna and Propagat., vol. 37, no. 4, pp. 418-425, Apr. 1989
2. 윤영중, 슬롯결합형 마이크로스트립 안테나의 성능개선에 관한 연구, 93 통신학술 연구과제 보고서, 1994. 3.
3. J. Lin and T. Itoh, "Active Integrated Antennas," IEEE Trans. Microwave Theory Technology, Vol. 42, pp. 2186-2194, Dec., 1994.
4. J. Birkeland and T. Itoh, "A 16-element quasi-optical FET oscilltor power-combining array with external injection locking," IEEE Trans. Microwave Theory Technology, Vol. 40, pp. 475-481, Mar. 1992.
5. B. Toland, J. Lin, B. Houshmand, and T. Itoh, "FDTD analysis of an active antenna," IEEE Microwave Guided Wave Lett., vol. 3, pp. 423-425, Nov. 1993.
6. C. A. Balanis, Antenna Theory, Analysis and Design, John Wiley & Sons, New York, 1982.
7. E. Brookner Ed., Practical Phased-Array Antenna Systems, Artech House, Boston, 1991.
8. D. M. Pozar, "A microstrip antenna aperture coupled to a microstripline," Electronic Lett., vol. 21,no. 2, pp. 49-50, Jan. 1985.
9. J. F. Zurcher, "The SSFIP, a global concept for high performance broadband planar antennas," Electronics Lett. , vol. 24, pp1433-1435, 1988.
10. H. Legay and L. Shafai, "New stacked microstrip antenna with large bandwidth and high gain," IEE Proc. vol. 141,Pt. H, pp. 199-204, 1994.
11. D. M. Sheen, S. M. Ali, M. D. Abouzahra, and J. A. Kong, "Application of the three-dimensional finite-difference time-domain method to the analysis of planar microstrip circuits," IEEE Trans. Microwave Theory Technology, Vol. 38, pp. 849-857, July, 1990

筆者紹介

▲윤 영 중

- 1981년 2월 : 연세대학교 전자공학과 졸업(공학사)
- 1986년 9월 : 연세대학교 대학원 전자공학과 졸업 (공학석사)
- 1991년 12월 : Georgia Institute of Technology 졸업 (Ph.D.)
- 1992년 3월~1993년 2월 : 한국전자통신연구소 위성통신기술연구단 선임연구원.
- 현재 : 연세대학교 전파공학과 조교수.