

主題

다중 송신 안테나와 다중 수신 안테나를 이용한 초고속 이동통신 시스템

서울대학교 황근철, 이광복

차례

- I. 서론
- II. Open Loop 송신 다이버시티 기법
- III. Closed Loop 송신 다이버시티 기법
- IV. MIMO 방식
- V. 결론

I. 서론

이동통신 환경은 유선채널과 달리 페이딩, 다중경로 간섭, Shadowing, 전파 감쇠, 시변 잡음, 간섭 등에 의해 낮은 신뢰도를 나타낸다. 이 중에서 다중경로에 의한 페이딩 현상은 서로 다른 경로를 겪어서 위상과 크기가 서로 다른 신호들이 수신되면, 위상차와 크기차에 의해 심한 왜곡을 겪은 신호로 변하게 되는 현상이다. 이러한 다중경로 신호에 의한 페이딩 효과는 이동통신 환경에서의 고속 데이터 통신 실현의 가장 큰 난제이며, 이를 효과적으로 대처하기 위해 많은 연구가 수행되었다. 대표적인 방법이 다이버시티 기법으로, 이는 독립적인 페이딩 현상을 겪은 여러 개의 신호를 수신하여, 결합 과정을 통해 페이딩 현상에 대처하게 된다. 이러한 다이버시티에 의한 페이딩 대처 방법은 우수한 성능을 내는 결로 알려져 있으며, 다양한 다이버시티 방법이 제안되고 현재 상용화되고 있다.

다이버시티를 얻는 방법으로는 크게 시간 다이버

스티, 주파수 다이버스티, 공간 다이버스티 등이 있다. 본 고에서는 주로 공간 다이버스티 기법에 대해 살펴보고자 한다. 공간 다이버스티는 송신기나 수신기, 또는 양쪽 모두에 여러 개의 안테나를 사용하여 다이버시티를 얻는 방법이다. 현재 역방향 링크의 수신기에 해당하는 기지국에 다중 수신 안테나를 채택하여 역방향 링크의 성능을 향상시키는 시스템이 상용화되어 있다. 순방향 링크의 경우 비슷하게 단말기에 다중의 수신안테나를 채택하여 성능을 향상시킬 수 있으나, 이 방식은 단말기의 적은 Power소모, 소형화, 경량화, Complexity 등의 제약에 의해, 구현상의 어려움이 있게 된다. 이에 기지국에서 송신시 다중의 안테나를 채택하여, 수신시 다중 안테나를 적용한 경우와 같은 다이버시티 효과를 내게 하여 순방향 링크의 성능을 향상시키고자 하는, 송신 다이버스티 기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이러한 다중 안테나 송신 다이버스티 기법은 한 기지국은 여러 개의 단말을 서비스하기 때문에 경제적으로도 적합한 방법으로 여겨지고 있다. 또한 이 방식은 차

세대 이동통신 시스템인 IMT-2000 시스템 및 IMT-2000이후의 초고속 이동 멀티미디어 서비스를 위한 고속 데이터 통신에 적합한 페이딩 극복 방법으로 여겨지고 있다.

본 고에서는 다중 송신안테나와 다중 수신안테나를 사용한 다이버시티 획득 방법에 대해 살펴보고자 한다. 다중 송신안테나를 이용한 송신 다이버시티 기법은 크게 수신기에서 송신기로의 되먹임 정보의 유무에 따라, Open Loop방식과 Closed Loop방식으로 나눌 수 있다. 본 고에서는 이러한 두 가지 방식에 대해 살펴보고, 아울러 서울대학교 이동통신 연구실과 삼성(종합기술원, 전자)에서 3GPP에 공동으로 제안하고 있는 Closed Loop방식의 되먹임 정보량을 효과적으로 줄이는 방안에 대해 살펴보기로 한다 [1-2]. 또한 다중 송신 안테나와 다중 수신 안테나를 채택하여 송신 데이터율을 높일 수 있는 Multiple Input Multiple Output(MIMO)방식에 대해 살펴보기로 한다.

II. Open Loop 송신 다이버시티 기법

Open Loop 방식은 수신기에서의 송신기로의 되먹임 정보없이 송신 다이버시티를 획득하는 방식이다. 여기서는 이러한 Open Loop방식 중 Orthogonal Transmit Diversity(OTD)[3]과 Time Switched Time Diversity(TSTD)[4]와 Space Time Transmit Diversity(STTD)방식울[5-7] 살펴 보기로 한다.

1. Orthogonal Transmit Diversity(OTD)

그림 1은 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 W-CDMA(Wideband CDMA)용으로 제안되었던 open loop방식의 Orthogonal Transmit Diversity(OTD)방식을

[3] 나타낸다.

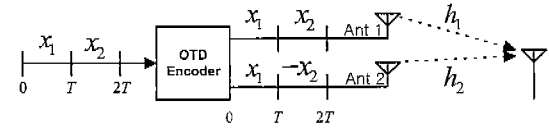


그림 1. OTD 방식 Block Diagram

송신 데이터 심볼 x_1 과 x_2 는 OTD encoder에 의해 첫번째 심볼 구간동안 안테나 1은 x_1 을 안테나 2는 x_2 를 송신하게 된다. 두번째 심볼 구간동안에는 안테나1은 역시 x_1 을 안테나2는 $-x_2$ 를 송신하게 된다. 이렇게 송신된 신호는 각 안테나로부터 h_1 과 h_2 의 채널을 겪어 수신 안테나에 수신 되게 되며 수신 신호는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$r_1 = h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1$$

$$r_2 = h_1 x_1 - h_2 x_2 + n_2$$

여기서 r_1, r_2 은 각각 symbol time 1과 2에 수신된 신호를 나타내며, n_1 과 n_2 은 각각 additive white Gaussian noise를 나타낸다. 이렇게 수신된 신호는 아래와 같은 OTD Decoding 과정에 의해 송신 데이터 심볼의 추정치를 얻게 된다.

$$\hat{x}_1 = (r_1 + r_2)h_1^* = 2|h_1|^2 x_1 + (n_1 + n_2)h_1^*$$

$$\hat{x}_2 = (r_1 - r_2)h_2^* = 2|h_2|^2 x_2 + (n_1 - n_2)h_2^*$$

위 식에서 알 수 있듯이 각 송신 심볼 x_1 과 x_2 는 각각 채널 h_1 과 h_2 를 거쳐서 수신된 형태를 띠게 된다. 즉, 송신 심볼 x_1 과 x_2 는 서로 독립적인 형태의 페이딩을 거쳐서 수신된 효과를 내게 되어 다이버시티를 획득하게 된다. 만약 하나의 송신 안테나로 두

심볼을 보내는 경우를 가정하면 이 경우 채널 상태가 나쁘면 두 심볼 모두 제대로 복원이 되지 않게 된다. 그러나 OTD 방식을 이용하면, 한 심볼이 채널 상태가 나빠 제대로 복원되지 않더라도, 상대적으로 채널 상태가 좋은 또다른 심볼은 제대로 복원 할 수 있게 된다. 즉, 두 안테나로부터의 채널이 동시에 나쁜 상황이 될 확률은 그만큼 적어지게 되므로 송신 심볼을 정확히 복원할 확률은 높아지게 된다.

2. Time Switched Time Diversity(TSTD)

그림 2는 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 W-CDMA(Wideband CDMA) 표준으로 채택된 open loop방식의 Time Switched Time Diversity(TSTD)방식(4) 나타낸다.

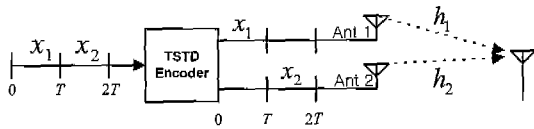


그림 2. TSTD 방식 Block Diagram

OTD 방식과 달리 TSTD방식은 송신 안테나를 번갈아가며 사용하는 형태를 보인다. 즉, 송신 데이터 심볼 x_1 과 x_2 는 TSTD encoder에 의해 첫번째 심볼 x_1 은 안테나1로 보내지고, 두번째 심볼 x_2 는 안테나2로 보내져서 송신되게 된다. 이렇게 송신된 신호는 각 안테나로부터 h_1 과 h_2 의 채널을 겪어 수신 안테나에 수신 되게 된다. 따라서 TSTD방식은 OTD와 마찬가지로 각 송신 심볼 x_1 과 x_2 는 각각 채널 h_1 과 h_2 를 거쳐서 수신된 형태를 띠게 되어 다이버시티 획득이 가능하게 된다.

3. Space Time Transmit Diversity (STTD)

그림 3은 3GPP(3rd Generation Partnership Project)의 W-CDMA(Wideband CDMA) 표준으로 채택된 open loop방식의 STTD(Space Time Transmit Diversity) 방식을(5) 나타낸다.

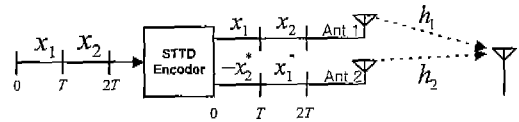


그림 3. STTD 방식 Block Diagram

송신 데이터 심볼 x_1 과 x_2 는 아래와 같은 시간과 공간을 이용한 부호화 과정을 거친 후, 각 안테나에 보내게 된다.

$$\begin{matrix} & \text{Ant1} & \text{Ant2} \\ \text{Time 1} & \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \end{pmatrix} \\ \text{Time 2} & \begin{pmatrix} -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \end{matrix}$$

이로부터 얻어지는 수신신호는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} r_1 &= h_1 x_1 + h_2 x_2 + n_1 \\ r_2 &= -h_1 x_2^* + h_2 x_1^* + n_2 \end{aligned}$$

수신기는 위와 같은 수신신호로부터 아래와 같은 decoding을 거쳐서 송신신호를 복원하게 된다 [5-7].

$$\begin{aligned} \hat{x}_1 &= r_1 h_1^* + r_2^* h_2 = (|h_1|^2 + |h_2|^2) x_1 + n_1 h_1^* + n_2^* h_2 \\ \hat{x}_2 &= r_1 h_2^* - r_2^* h_1 = (|h_1|^2 + |h_2|^2) x_2 + n_1 h_2^* - n_2^* h_1 \end{aligned}$$

위와 같은 decoding과정을 거치고 나면 각 송신 데이터 심볼은 모두 채널 h_1 과 h_2 를 거쳐서 수신된

신호를 결합한 형태를 띠게 되어 다이버시티를 획득하게 된다. 그림 4는 STTD방식의 성능을 나타내는 그림으로, 송신 안테나수가 1인 다이버시티를 채택하지 않은 시스템과 성능을 비교하였다. 여기서 비트오율이 10^{-2} 인 경우를 고려하면, STTD방식은 단일 안테나 시스템과 비교하여 약 5.5dB의 이득이 있음을 알 수 있다.

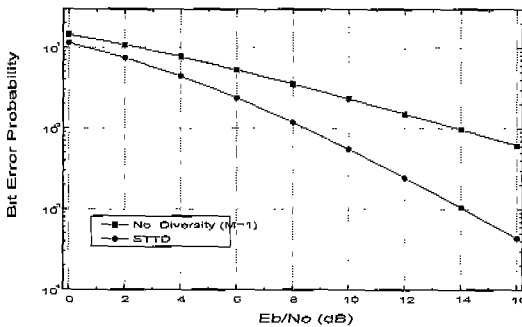


그림 4. STTD 방식의 성능

III. Closed Loop 송신 다이버시티 기법

Closed Loop 방식은 수신기에서 송신기로의 되먹임 정보를 전송하고, 송신기에서는 데이터 전송시 이 정보를 이용함으로써 다이버시티를 얻고자 하는 방식이다. 이에 필요한 되먹임 정보는 채널 상태에 대한 정보 또는 각 송신 안테나에 필요한 가중치 정보에 해당하게 된다. 여기서는 이러한 Closed Loop 방식 중 현재 3GPP 시스템용 송신 다이버시티 방식으로 채택된 TxAA(Transmit Antenna Array) 방식[8]에 대해 살펴보기로 한다.

1. Transmit Antenna Array(TxAA) 방식

그림 5은 3GPP의 W-CDMA 시스템에서 closed loop 송신 다이버시티로 채택된 TxAA 방식의 간략한 개념도이다.

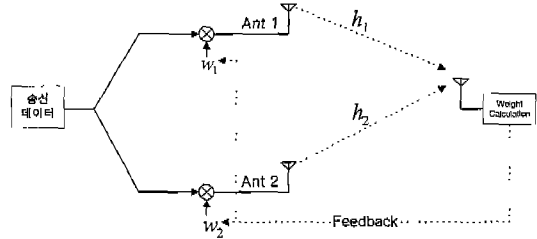


그림 5. TxAA 시스템 Block Diagram

이 방식은 데이터를 송신하기 전에 송신 안테나 별로 가중치 $w_1 = h_1^* / \sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2}$, $w_2 = h_2^* / \sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2}$ 을 곱하여 송신하게 되며, 이 가중치는 이동국(mobile station)에서 구하여 기지국(base station)으로 feedback된 값을 이용하게 된다. 이렇게 송신된 신호는 채널을 거쳐 수신되게 되며, 수신 신호는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 r &= (w_1 h_1 + w_2 h_2)x + n \\
 &= \sqrt{|h_1|^2 + |h_2|^2} x + n
 \end{aligned}$$

따라서, 송신 심볼은 채널 h_1 과 h_2 를 거쳐서 수신된 신호를 결합한 형태를 띠게 되어, 다이버시티를 획득이 가능하게 된다. 또한 이 방식은 앞장의 open loop방식인 STTD방식과 비교 3dB의 average SNR(signal to noise ratio) 이득이 있음이 알려져 있다.

이러한 TxAA방식은 앞서 살펴본 바와 같이 기존의 수신 다이버시티나 STTD방식보다 우수한 성능을 지니고 있으며, 또한 2개 이상의 안테나로의 확장이 용이하다. 서울대학교 이동통신 연구실과 삼성에서는 이러한 TxAA방식의 성능향상과 용이한 확장성을 찾아내서, 현재 2개 안테나로만 국한되어 있는 TxAA방식을 2개 이상 안테나를 사용한 방식으로 확장할 것을 3GPP에 제안하였다[1]. 이 절의 나머지와 다음 절에서는 2개 이상의 송신안테나를 갖는

TxAA시스템에 대해 살펴보기로 한다.

M 개의 송신 안테나를 채택한 TxAA시스템은 위와 비슷한 결과로부터 M 차의 다이버시티 이득과 함께 $10\log(M)$ dB의 Average SNR 이득이 있음을 알 수 있다. 그림 6은 여러 가지 송신 안테나 수에 따른 TxAA 시스템의 성능을 나타내는 그래프이다. 비교를 위하여 다이버시티를 채택하지 않은 단일 송신 안테나 시스템과 앞장의 STTD방식의 성능을 함께 그렸다. 이 그림에서 알 수 있듯이 TxAA방식은 송신 안테나 수가 증가함에 따라 다이버시티 효과에 의해 그래프의 기울기가 급격해 짐을 알 수 있다. 또한 송신 안테나 수 증가와 비례하여 SNR이 개선됨을 알 수 있다.

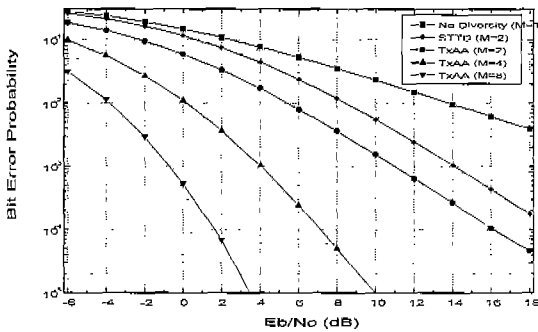


그림 6. TxAA의 성능

이러한 성능 증가에 반하여, TxAA 방식은 송신 안테나 수가 증가하게 되면, 되먹임에 필요한 정보가 송신 안테나 수에 비례하여 증가하기 때문에, 다중의 송신 안테나를 사용하는 경우, 되먹임에 필요한 채널 용량을 늘려야 하는 단점이 있다. 또한 송신 안테나 수의 증가에 따른 되먹임 정보의 증가는 되먹임에 필요한 시간 즉, 지연시간의 증가를 가져오게 된다. 이렇게 지연 시간이 증가하게 되면, 최적 안테나 가중치 정보를 되먹임 시키는 동안 채널 상태가 바뀌게 되어 심각한 성능 저하를 가져올 수 있게 된다. 따라서, 되먹임 방식에 의한 다중 송신 안테나 다이버시티 획득 방식 적용의 가장 큰 문제는 되먹임 정보량

증가에 있다. 따라서, 많은 수의 송신 안테나를 채택한 경우, 되먹임 방식은 되먹임 정보량에 의해 상당한 제한을 받게 된다. 다음절에서는 이러한 문제를 해결하고자, 되먹임 정보의 적절한 근사에 의해 되먹임 정보량을 줄이고, 최적의 성능을 보장할 수 있는 방법에 대해 살펴보고자 한다[2].

2. Efficient Weight Vector Representation for TxAA with more than 2 Tx Antennas

M 개의 송신 안테나로 이루어진 TxAA시스템에서의 최적의 송신 안테나 가중치 벡터 W_{opt} 는 송신 안테나 수와 같은 M 개의 값으로 이루어 지게 된다. 간단한 예로 송신 안테나 수가 3인 경우를 생각하면, 최적 송신 안테나 가중치 W_{opt} 는 3차원 벡터 $W_{opt} = [a \ b \ c]$ 로 표현 가능하다. 각 차원의 기저벡터는 각각 $B_1 = [1 \ 0 \ 0]$, $B_2 = [0 \ 1 \ 0]$ 와 $B_3 = [0 \ 0 \ 1]$ 라고 하면, W_{opt} 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$W_{opt} = a \cdot B_1 + b \cdot B_2 + c \cdot B_3$$

여기서 각 원소의 크기관계가 $|a| > |b| > |c|$ 라고 가정하면, W_{opt} 는 1차원 또는 2차원 정보로 근사가 가능하며, 이 경우 최적 근사는 아래와 같이 표시할 수 있다.

$$1\text{차원 근사} : W_{1\text{차원}} = a \cdot B_1$$

$$2\text{차원 근사} : W_{2\text{차원}} = a \cdot B_1 + b \cdot B_2$$

이러한 근사화된 정보를 되먹임 시켜서 송신 안테나 가중치로 사용하게 되면, 되먹임에 필요한 정보량은 근사화 차원이 작을수록(근사화가 심해질수록) 그만큼 줄어들게 된다. 다만 여기서 근사화에 따른 성

능 저하를 기대할 수 있으나, 근사화가 해당 차원에서 최적으로 이루어지기 때문에 성능 저하는 그리 크지 않게 된다.

그림 7은 송신 안테나 수 (M)가 3인 경우의 제안 시스템의 성능을 나타낸다. 그림에서 S 는 근사화 차원의 수를 나타낸다. 즉, $S=2$ 인 경우는 3차원의 가중치 정보를 2차원으로 근사화한 경우를 나타낸다. 비교를 위해서 안테나 수가 2인 경우 근사화를 사용하지 않은 경우 ($M=2, S=2$)를 같이 그렸다. 이 그림으로부터, $S=2$ 인 경우(3차원 가중치 정보를 2차원으로 근사)의 성능은, 근사하지 않은 경우와 거의 비슷한 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 1차원 근사만으로도 송신 안테나 2개를 사용하고 근사하지 않은 경우와 비교하였을 때, 더 우수한 성능을 얻을 수 있다. 그림 8은 송신 안테나 수가 4인 경우의 성능을 나타낸다. 송신 안테나 수가 3인 경우와 비슷하게, 2차원과 3차원 근사를 이용하면 근사화하지 않았을 때와 거의 비슷한 성능을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 또한 모든 근사화 방법에 의한 성능은 송신 안테나를 2개 또한 3개 써서 근사화하지 않고 가중치를 적용하였을 때보다 비슷하거나 우수한 성능을 얻을 수 있다.

IV. Multiple Input Multiple Output (MIMO) 방식

인터넷과 멀티미디어 서비스의 폭발적인 증가에 따라, 고속 데이터 서비스는 차세대 시스템의 주요한 부분으로 부각이 되고 있다. 이에 따라 높은 주파수 효율 획득은 현재와 미래의 무선 통신 시스템에서 중요한 부분으로 인식되고 있으며, 현재 높은 주파수 효율의 획득을 위해 다양한 방식의 새로운 기법이 도입되고 있다. 한 예로 다중 송수신 안테나를 이용한 Multiple Input Multiple Output(MIMO) 시스템을 들 수 있다. 이러한 다중 송수신 안테나 시스템에 대한 선도적인 연구는 Bell Lab에서 이루어졌으며, 이는 BLAST(Bell Lab Layered Space Time) 또는 Space Division Multiplexing 시스템 또는 MIMO 시스템이라 불리어 지고 있다.

그림 9는 MIMO시스템의 간략한 예로, 송신 안테나 수가 n_T 이고, 수신 안테나 수가 n_R 인 경우를 나타내고 있다. 이러한 MIMO 시스템은, 앞에서 설명한 송신 다이버시티 시스템과 달리, 각 송신 안테나에 서로 다른 데이터 신호 x_1, x_2, \dots, x_{n_T} 신호를 송신 하게 된다. 이렇게 송신 안테나 마다 다른 송신 신호를 송신 함으로써 기존 시스템 보다 송신 안테나 수 n_T 만큼 더 많은 데이터를 송신 하게 된다. 이렇게 송신된 신호는 수신 안테나로의 채널 H 을 겪어 수신되게 된다. 수신된 신호는 원하는 신호와 간섭신호가 중첩된, 즉 각 송신안테나 신호가 원하는 신호인 동시에 간섭신호의 역할을 하게 되는 형태를

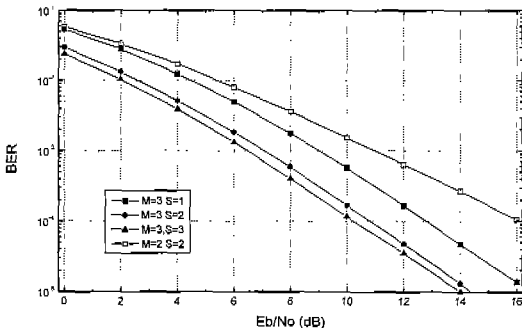


그림 7. 송신 안테나수가 3인 경우, 가중치 근사화 방법의 성능

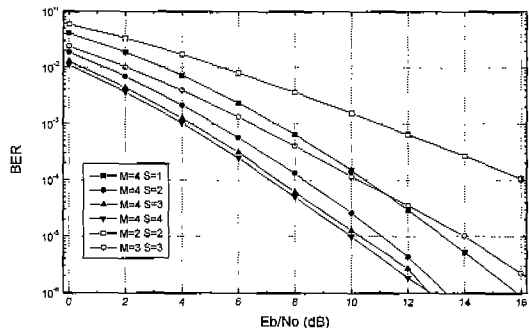


그림 8. 송신 안테나수가 4인 경우, 가중치 근사화 방법의 성능

때게 된다. 이러한 형태의 신호는 다양한 형태의 다중 사용자 수신기를 통해 원하는 신호를 복원해 낼 수 있다.

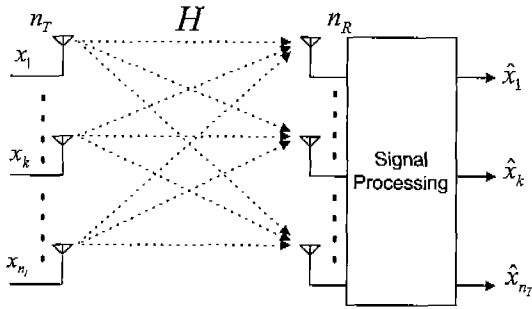


그림 9. MIMO 시스템

V. 결 론

본 고에서는 최근 활발한 연구가 진행중인 다중 송신 안테나와 다중 수신 안테나를 채택한 다양한 다중 송신 다이버시티 기술에 대해 살펴 보았다. 다중 송신 안테나를 이용한 송신 다이버시티 기법은 크게, 되먹임 정보의 유무에 따라, open loop 방식과 closed loop 방식으로 나눌 수 있다. 본 고에서는 open loop 방식 중, OTD 방식과 3GPP에서 표준으로 채택중인 TSTD 방식과 STTD 방식에 대해 살펴 보았다. Closed loop 방식은 현재 3GPP에서 2개 송신 안테나를 이용한 TxAA 방식이 표준으로 채택되어 있으며, 현재 2개 이상의 송신 안테나로의 확장 방식에 관한 연구가 활발히 진행 중이다. 본 고에서는 이의 일환으로 서울대학교 이동통신 연구실과 삼성이 공동으로 3GPP에 제안하고 있는, closed loop 방식의 TxAA 시스템에서 2개 이상의 송신 안테나를 적용시 적합한, 효과적인 가중치 표현 방법에 대해 살펴보았다. 아울러 다중 송신 안테나와 다중 수신 안테나를 이용하여 송신 데이터율을 높일 수 있는 MIMO 방식에 대해서도 살펴보았다.

감사의 글

III장 2절에 있는 내용은 서울대와 삼성종합기술원의 김기호 박사와 김성진 전문연구원의 여러 연구원의 협조에 의하여 수행되었습니다.

※ 참고문헌

- [1] Samsung and Seoul National University, "Proposal for the use of closed loop Tx diversity with more than 2 Tx Antennas," TSG-RAN WG1#12, R1-00-0506, Seoul, Korea, September 2000.
- [2] Samsung and Seoul National University, "Preliminary version of algorithm and Simulation results for Tx Diversity with more than 2 Tx Antennas," TSG-RAN WG1#14, R1-00-0882, Oulu, Finland, July 2000.
- [3] Motorola, "Orthogonal transmit diversity for CDMA forward link," FPLMTS Study Committee, Air-Interface WG, SWG2, Document Number AIF/SWG-2-16-26 (P).
- [4] Nokia and Samsung, "UTRA FDD downlink transmission diversity concept," Tdoc SMG2 315 UMTS-L1/98, Helsinki, Finland, September, 1998.
- [5] Texas Instruments, "Space-time block coded transmit antenna diversity for WCDMA," proposed TDOC #662/98 to ETSI SMG2 UMTS standards, Dec. 1998.
- [6] V. Tarokh, H. Jafarkhani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes

from orthogonal designs." *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 45, pp. 1456-1467, July 1999.

- [7] S. M. Alamouti, "A simple transmitter diversity scheme for wireless communications," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 16, pp. 1451-1458, Oct. 1998.
- [8] 3GPP, "Physical layer procedures (FDD)," Tech. Spec., Doc. #: 3G TS 25.214 version 3.0.0, Oct., 1999.



황근철

1997년 서울대학교 전기공학부 학사
1999년 서울대학교 대학원 석사
1999년~현재 서울대학교 대학원 박사과정



이광복

1982년 캐나다 토론토 대학교 Engineering Science 학사
1985년 캐나다 토론토 대학교 전자공학 석사
1990년 캐나다 맥매스터 대학교 전자공학 박사
1982년~1986년 캐나다 모토롤사 선임연구원
1989년~1990년 캐나다 Bell Northern Research 선임연구원
1990년~1996년 미국 모토롤라 이동통신연구소 수석연구원
1996년~현재 서울대학교 전기공학부 부교수
2001년~현재 IEEE J-SAC Associate Editor