

衛星電波 追跡을 위한 5-Beam Feed Single-Channel

Amplitude-Comparison Monopulse 시스템

\* 陸 在 林 , \*\* 朴 漢 奎

\* 電波 研究所 , \*\* 延世 大學校

( A Five-Beam Feed Single-Channel Amplitude-Comparison Monopulse System for Satellites Tracking)

\* Jai-Rim YUK , \*\* Han-Kyu PARK

\* Radio Research Laboratories , \*\* Yonsei University

ABSTRACT

In this paper, A 5-Beam Feed Single-Channel Amplitude-comparison Monopulse System for Satellites Tracking of 1.5 GHz to 1.75 GHz band.

The system consisted of a 5m Parabolic reflector, 5-Beam feed Cross-dipole arrays for Azimuth and Elevation Difference and Sum signals for the direction of arrival, Hybrid Networks and Monoscan-converter, Receiver with detector, and Azimuth-over-Elevation Mount.

Results indicated that tracking accuracy was less than ±0.01(deg) with tracking range is ±3.5(deg) by the Geostationary and Polar-Sun Synchronous Orbit Satellites.

1. 序 論 :

人工衛星 運用을 위하여는 追跡, 監視 및 制御 (TT&C: Tracking Telemetry and Commanding)가 必要하다.

人工衛星의 位置와 軌道 豫測 및 監視를 爲한 追跡 方法으로는 i) 天體 망원경에 Camera를 장착한 Schmitt Camera와 Laser등을 이용한 光學的 추적方式과 ii) Radar 에 의한 探索 및 追跡, 그리고 人工衛星에서 送信되는 Beacon파를 受信하여 Doppler 効果, Interferometer에 의한 追跡 및 自動 안테나 追跡 등 電波 到來方向을 利用한 追跡方式이 있다.

自動 안테나 追跡 방식은 Sequential-Lobing 방식이 初期 追跡 Radar에 利用 되었으나 이 방식은 追跡 目標에 따른 反射波의 受信 強度 變動과 Scanning에 의한 變動 效果로 추적 誤差가 發生 된다.

이러한 誤差 改善을 위해 Dr. R.M. Page가 4-Beam Feed Simultaneous-Lobe Amplitude Comparison 추적 방식을 1943~1944년에 開發, 1946년 H.T. Budenbom이 Monopulse라는 用語의 提案 으로 불리어졌다. [1][2][3]

본 論文은 電波 研究所에서 設計 및 設置한 1.5GHz~12.2 GHz帶의 衛星電波 追跡 및 受信 시스템중 自動 추적 機能을 갖는 1.5~1.75 GHz의 RHCP와 LHCP의 Dual-Polarization 5-Beam Feed Single-Channel Amplitude Comparison Monopulse 방식의 特性, 設計와 實驗 結果이다. [15][16]

2. Monopulse :

2-1 Monopulse 方式 : Boresight-Axis에 對稱된 Squinted Beam v1과 v2에 의해 0만큼 off-axis된 신호를 Hybrid junction에 의해 Sum과 difference 신호 s,d를 發生하면:

s = 1/2 (v1+v2) , d = 1/2 (v1-v2) ... (1)

水平面과 垂直面의 追跡을 위해 focal-plane axis상에 對칭된 4개 Horn에 의한 Beam을 發生하여 Sum과 difference 신호인 s,daz,del 신호를 發生하면 :

s = (A+B+C+D) / 2 ... (2)

daz = ((C+D)-(A+B))/2 ... (3)

del = ((A+C)-(B+D))/2 ... (4)

가 되고, 또 水平과 垂直面상의 각 Beam들 간에는:

- 수평면상 : v1 = (C+D)/√2 , v2 = (A+B)/√2 ... (5)

- 수직면상 : v1 = (A+C)/√2 , v2 = (B+D)/√2 ... (6)

또 s,d는 複素 函數 特性을 갖으므로 d/s와 位相關係는: |ρ|

s = |s| Exp(j δs) , d = |d| Exp(j δd) ... (7)

d/s = |d|/|s| (cos δ + j sin δ) ... (8)

δ = δd - δs ... (9)

d/s = {1-(v2/v1)}/(1+(v2/v1)) ... (10)

位相關係는 RF를 IF換換시 I(In-phase)成分과 Q(Quadrature-phase)成分을 Si,Sq,Di,Dq 라 하면:

Si = Re(s) = |S| cos δs, Sq = Im(s) = |S| sin δs (11)

Di = Re(d) = |D| cos δd, Dq = Im(d) = |D| sin δd (12)

s = Re(s)+jIm(s)=Si+jSq , d=Re(d)+jIm(d) =Di+jDq (13)

여기에 S의 Conjugate(S\* = Si-jSq)를 곱하면

D/S = DS\*/SS\* = (DiSi+DqSq+j(DqSi-DiSq))/(Si^2+Sq^2) ... (14)

d/s는 I와 Q가 0과 90도 位相關係, Exp(j δ)는 δ=0도, ±180도 가 되어 1, -1, ±j의 實數 또는 虛數 抽出 利用이 可能하다.

2-2 Monopulse 구성요소 : 衛星追跡 시스템은 Antenna Mount, Antenna와 Feed, Sum과 difference 발생器, Comparator, 追跡受信 및 制御裝置로 構成하고, Simultaneous Lobe 比較를 위한 Feed 슬러 신호를 Sum과 difference로 發生시키기 위해서 M/W Hybrid-Junction 素子를 直.並列 利用시 comparator 입력 전력은 : [3][4][5][6][7][8]

$$V = A = B = C = D \quad \dots(15)$$

$$4V^2 = A^2 + B^2 + C^2 + D^2 \quad \dots(16)$$

$$(A+B+C+D)/4 = (4V)/4 = V \quad \dots(17)$$

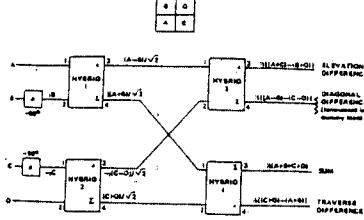


그림 1 Monopulse Comparator

2-3 振幅比較方式와 位相比較方式 : i) 振幅 比較方式은 reflector의 이용과 Multiple-Beam을 이용 수신되며 on-axis시 s=최대, d=0, off-axis시 角度变化에 따른 電圧이 변화하는 対稱된 Squinted-Beam을 利用. [4][8]

ii) 位相 比較方式은 2개의 Beam이 axis와 平行하며 phase-Center가 axis 반대 方向으로 옆으로 變位되어 있고, 수신 진폭 특성은 같으나 위상특성이 受信角度에 따라 變化하는 Beam을 이용

i) 振幅比較方式의 2-Beam은 Uniform phase taper 특성으로 Illumination phase factor는 水平面 Squinted angle [11]

$$\alpha'_{sq} = \exp + jkxUsq \quad \dots(18)$$

Usq = sin α'sq가 되어 振幅 Ae(x)는 x의 even 函數로서

$$\text{Sum Illumination} = 2Ae(x) \cos(kxUsq) \quad \dots(19)$$

$$\text{Difference Illum.} = j2Ae(x) \sin(kxUsq) \quad \dots(20)$$

위 두함수는 In-Phase Quadrature가 成立

$$\text{Sum} = 2 \int Ae(x) \cos(kxUsq) \cos(kxUsq) dx \quad \dots(21)$$

$$\text{Diff} = -2 \int Ae(x) \sin(kxUsq) \sin(kxUsq) dx \quad \dots(22)$$

위식에서 s, d는 實數가 되어 In-Phase로서 振幅 比較에 利用.

ii) 位相比較 方式의 경우 One-dimensional 안테나에서 2개의 Array에 수신된 전압을 v1p, v2p라 하면:

$$s = \frac{(v1p+v2p)}{2} = \sqrt{x} \frac{\sin t}{t} \cos t \quad \dots(23)$$

$$d = \frac{(v1p-v2p)}{2} = j\sqrt{x} \frac{\sin t}{t} \sin t \quad \dots(24)$$

$$t = (\pi/2)(x/\lambda) \sin \theta, \quad d/s = j \tan t \text{가 된다.} \dots(25)$$

2-4 Optimum Feeds : 振幅比較에 의한 誤差決定을 위한 Sum과 difference 결정을 위해 Antenna의 利得, Beam폭, side-lobe 및 偏波特性이 設計시 考慮되어야 한다. [9][10][11][12]

Reflector형 안테나에서 f/D비가 적을 경우 설계가 어렵고, Beam폭이 넓으며, 위상특성이 均一하고 直線偏波 특성이 나쁘며, f/D가 클 경우 반사경 두께가 얇고, 直交偏波 특성이 양호하나 Feed가 멀어지고, Feed 支持와 spill-over 특성이 나쁘다. 보통 f/D 비를 0.3~0.5로 이용한다.

有效 Squint Angle은 Squinted Beam 합수가 Sin(x)/x로 가정시 角度가 클수록 광학적 결함도가 적어진다.

foresight-axis 기준의 Squinted Angle θsq 의 Beam v1과 v2에 θ방향으로 到來된 受信信號는:

$$v1 = \frac{\sin(2.783(\theta-\theta_{sq}))}{2.783(\theta-\theta_{sq})} \quad \dots(26)$$

$$v2 = \frac{\sin(2.783(\theta+\theta_{sq}))}{2.783(\theta+\theta_{sq})} \quad \dots(27)$$

$$s = (v1+v2)/\sqrt{2}, \quad d = 0.207/\sqrt{2} \quad \dots(28)$$

따라서 Optimum같은 squinted Beam폭의 0.468, Squint角은 S=1.047, kd=1.436, θbw=1.181, Beam들의 交叉점은 각 Beam peak치의 -2.61dB가 되며 Sum Beam폭의 0.411(=0.486/1.181)이 되는 Normalized Monopulse Slope (kd)는 1.62가 된다.

2-5 Monopulse Processor : Antenna로 부터 受信된 信號를 誤差角에 対応한 normalized 出力(d/s)으로 發生시키기 위해서 Sum과 difference 成分을 다음과 같이 利用. [10][11][12][13]

- i) Sum과 difference 複素比는 實數係를 이용 : Re(d/s) ;
  - 2) d/s의 크기비는 d/s위상에 Cosine과 곱을한다: |d/s|cos δ
  - 3) difference 성분은 Sum과 同位相이며, Sum크기와 나누어진다.
- 位相과 直線振幅 방식, 위상과 Log-Amp 방식, I와 Q 방식 그리고 Dot Product와 AGC 방식 등이 이용.

2-6 5-Beam Feed 방식 : 기본 Monopulse 방식은 4개의 Squinted Beam을 이용하고 있으나, 중앙에 Reference Beam을 Sum-Pattern용으로 이용하고 上下, 左右의 4개 Beam은 Daz, Del 용으로 利用시 RF Networks의 構成이 容易하고 Sum-Beam을 수신과 각종 Ranging 등에 이용하므로서 單一 Channel의 구성과 獨立 이용으로 回路가 간단하고, 効率が 좋으며, Sum-Pattern의 Optimum Beam폭이 좁아지고 Outer-Beam의 Squint角은 Optimum각 보다 커져서 追跡 範圍가 廣大된다. 특히 Dual-Polarization 이용시 되르 특성이 좋다. [9][10][11][12]

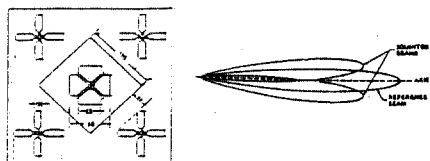


그림 2 5-Beam Feed와 Pattern

### 3. 시스템 설계 및構成

본 시스템의 全体的構成은 追跡,受信,測定 및 分析,데이터 記錄과 출력 機能으로 区分하여 追跡 시스템은 直徑 5m의 Parabolic Reflector, 衛星 追跡 使用 Array는 中央에 Reference Beam (Sum-Beam)을 Cavity-backed Cross-Dipole Array 와 水平,垂直面上의 difference Beam 發生을 위한 4개의 Cross-dipole Array를 이용 하였으며,각 Array는 箒面 Balun 回路의 구성으로 Coaxial 출력 port에 Hybrid 회로에 의해 偏波 選擇후, Reference-Beam 출력은 직접 Sum 수신에 利用하고,4개의 Array 出力을 3dB-Coupler에 의해 Azimuth와 Elevation 의 difference 信號를 發生, 500~1200 Hz의 矩形波 Scan-Code 신호에 의해서 Daz와 Del 입력을 0도와 180度 Phase Shift로 順次的 變換, 이신호를 Coupler에 의해 S-band의 Sum 信號를 Coupling 시켜 RF가 Daz,Del에 對應하는 誤差전압에 의해 振幅變調가 追跡 수신기에 利用 Single Channel Monopulse System 이 構成되고, 追跡 受信機에서 Daz,Del에 對應한 Video 信號 전압을 檢出하여 追跡誤差 Command 信號로 利用, Antenna Mount 내부의 SCR전력 증폭기에서 電力 增幅후 mount의 Azimuth와 Elevation Servo Motor 를 驅動시킨다.[15][16]

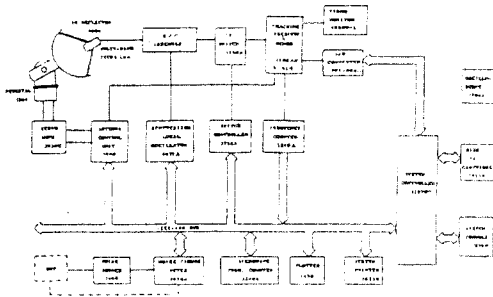


그림 3-1 위성전파 추적시스템 구성도

### 4. 실험 및 考察

4-1. Antenna 特性 :5-Beam Feed Array에 대한 RHCP와 LHCP의 Return Loss ,Primary Pattern 그리고 Axial ratio를 측정한 결과 Sum과 Azimuth 및 Elevation의 Beam幅은 같으나 相對 利得이 Sum-Azimuth가 周波數 增加시 낮고 ±44度~34度, Squint-Beam 은 ±30~34度 이고, Beam폭은 ±18度 이었다. Elevation Plane상의 Sum port의 Axial-ratio는 Elevation-difference 의 1.5GHz의 경우 4dB, 1.6GHz의 경우 2.2dB 그리고 1.7GHz의 경우 1dB의 最下치가 되었다.

4-2 衛星 追跡 : 衛星 追跡 實驗을 爲한 S-Band 使用 衛星인 INMARSAT (E-63, E-179),GMS-3(E-140)등의 追跡方向 諸源을 구하고 静止衛星을 追跡 實驗하였다.

표 1 静止衛星 추적方向 諸源 [Deg.]

Satellite	Longitude	Azimuth	Elevation
INMARSAT	E-63	253.464	11.914
INMARSAT	E-179	115.335	21.134
GMS-3	E-140	159.098	44.522
BS-2b	E-110	206.644	43.129

追跡方向 指示데이터 誤差角은 추적 방향에서 ±1.5度の 平均値와 誤差의 標準偏差 ±0.7度, ±3.5度 以上시 追跡機能을 喪失, 또한 수신 周波數에 따라 追跡誤差가 變動하였다.

또한 S-Band 1.7GHz 주파수와 1일 14圈 정도를 98度の 傾斜角으로 약 800km 高度로 極軌道 運動을 하는 TIROS-N/NOAA-9,10호 衛星을 軌道豫測 Program에 의해 豫算을 算出 하여 추적 實驗한 結果 추적 指示値와 豫測値가 一致하였다. 이때 Doppler效果에 의해 수신 주파수가 ±40KHz 정도 變化에 의한 再 同調가 要求 되었다. [16]

實驗結果 誤差 발생과 주파수에 의한 影響은 다음과 같이 推定된다.

- 1) 伝播 到來時 電離層과 大氣圈에서의 屈折과 Scintillation 및 De-focusing.
- 2) 수신 仰角에 따른 大地 反射波와 Multi-path 등.
- 3) 追跡 시스템의 Cross-Loop 制御특성과 안테나 回轉時의 慣性 및 Bias 不平衡 등. [14][16]

### 5. 結論

國內 最初 衛星電波 수신研究을 위한 直徑 5m의 Parabolic Antenna 를 利用한 受信 시스템을 電波研究所에서 設計 및 設置하였다. 이 시스템의 受信可能 주파수는 1.5~12.2GHz의 広帶域이며 1.5~1.75GHz와 2.1~2.3GHz 의 S-Band는 RHCP와 LHCP의 衛星電波 自動追跡을 한다.

S-Band 5-Beam Feed Array는 Monopulse 發生을 위한 中央의 Reference-beam (Sum)을 Cavity-Backed Cross-Dipole Array와 上下左右的 Azimuth 와 Elevation difference Beam 發生용 4개의 Cross-Dipole Array에서 受信된 信號를 Scan-code에 의해 追跡 誤差에 對應한 Single-Channel의 振幅變調된 信號를 追跡 受信機와 Detector에서 檢出하여 Azimuth와 Elevation Servo-Motor를 驅動 시킨다.

시스템에서 사용된 Antenna는 F/D ratio 0.373과 Sum-beam 幅 ±34.44度 ,Squint-beam 角度와 幅이 ±30~34度와 ±18度였다.

人工衛星 追跡을 爲한 對象 衛星은 S-Band의 受信이 可能的인 地球静止 軌道 衛星인 E-63度와 E-179度の INMARSAT, E-140度の GMS-3 그리고 極軌道 衛星인 TIROS-N/NOAA-9,10호를 追跡 實驗 結果 各래도 위성도 軌道 豫測値와 같 一致되고 있으며, 추적 誤차는 ±1.5度以內 이고, 標準偏差는±0.8도 이내 이었으며, ±3.5度以上の 誤差가 發生時 限界 範圍로서 有効追跡 範圍은 ±3도 以內였다.

또한 追跡誤차는 주파수 變化에 따른 안테나와 RF-Networks의 特性,기타 伝播通路上的 大氣와 電離圈 影響과 受信 仰角에 따른 Multi-path등의 영향,그리고 시스템에서의 制御回路와 안테나 回轉시 慣性 등 影響이 誤차를 發生시키는 要素으로 생각 된다.

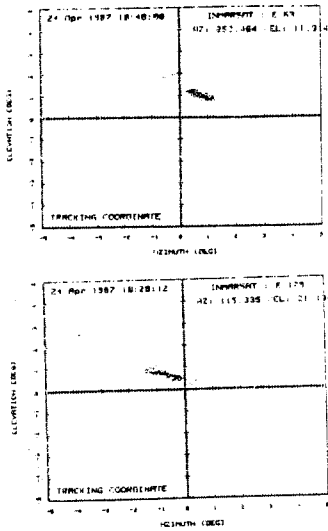


그림 4: INMARSAT Auto-Tracking 추적

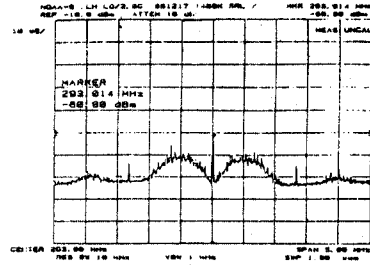


그림 5 TIROS-N/NOAA - 수신 SPECTRUM

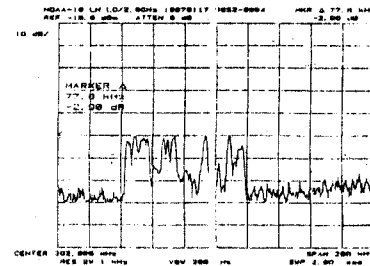


그림 6 TIROS-N/NOAA Doppler 주파수 편이

\* 参考文献 \*

1] R.M. Page, "Accurate Angle Tracking by Radar", Report RA-3A-222A, Naval Research Laboratory, Dec. 1944

2] D.R.Rhodes, "Introduction to Monopulse", pp 1-2, Artech House, 1959

3] C.M.Kirkpatrick "Final Engineering Report on Angular Accuracy Improvement", Signal Corps Project 22-122-B-0 General Electric Company Report, Aug. 1952

4] R.W.Martine and L.Schwartzman, "A Monopulse Cassegrainian Antenna", pp 96-102, IRE Conv.Record, pt.1,1960

5] R.E.Collin, "Foundations for Microwave Engineering", pp270~285, McGraw-Hill, 1966

6] J.H.Dunn and D.D.Howard, "Precision Tracking with Monopulse Radar", pp 51-56, Vol-35, No.17, Electronics, Apr.1960

7] S.M.Sherman, "Complex Indicated Angles Applied to Unresolved Targets and Multipath, IEEE Trans.AES, Vol-7, No.1, pp 160-170, Jan. 1971

8] 電子通信学会, "Antenna工学 H.B", pp 494-504, Ohm社, 1980

9] P.W.Hannan, "Optimum Feeds for all Three modes of a Monopulse Antenna", IRE Trans. Ap-9, No-5, pp 444-461 Sep. 1961

10] W.L.Rubin and S.K.Kamen, "SCAMP A New Ratio Computing Technique with Application to Monopulse", Microwave J., pp 83-90, Dec. 1964

11] H.E.Bartlett, "A Broadband Five-Horn Cassegrain Feed" IEE, Antennas and Propagations, Part-1, pp350-354, IEE International Conf. London, 1978

12] L.J.Ricardi and L.Niro, "Design of a Twelv-Horn Having Independent Optimization of the Sum and Difference Modes", IRE Conv Record Pt.1, pp 57-60, 1961

13] J.T.Nessmith, "New Performance Records for Instrumentation Radar", Space/Aeronautis, pp 86-93, Dec. 1962

14] 육 제림 외3, "UHF 전파전파 연구", 연구보고서 제32호, pp 1~51, 전파연구소, 1978

15] 육 제림 외1, "위성전파 수신시설", 연구보고서 제37호, pp 56-61 전파연구소, 1983

16] 육 제림 외1, "우주개발 동향과 위성전파 추적수신", 연구보고서 제40호 pp 13-16, 전파연구소, 1986