



เอกสารอ้างอิง

1. G.H. Bryant, : "Propagation in corrugated waveguide", Proc. IEE, Vol.116, No.2, February 1969, pp.203-213.
2. P.J.B. Clarricoats and P.X. Saha : "Propagation and radiation behaviour of corrugated feeds Part 1-Corrugated-waveguide feed", Proc. IEE, Vol.118, No.9, September 1971, pp.1167-1176.
3. B. Maca. Thomas, : "Theoretical performance of prime-focus parabolooids using cylindrical hybrid-mode feeds", Proc. IEE, Vol. 118, No.11, November 1971, pp.1539-1549.
4. H.C. Minnett and B. Maca Thomas, : "Fields in the Image Space of Symmetrical Focusing Reflectors", Proc. IEE, Vol.115, Oct. 1968, pp.1419-1430.
5. Motoo Mizusaw, Fumio Takeda, and Shin-Ichi Netsudan, : "Radiation Characteristics of a corrugated Conical horn", Trans. IECE '73/1 Vol.56-B, No.1 pp.14-19.
6. Funio Takeda and Tsutomu Hashimoto, : "Effects of the fin Thickness and the slot Pitch on Propagation Characteristics in the Corrugated Circular Waveguide", Trans. IECE '73/12 Vol.56-B No.12, pp.543-550
7. R.E. Collin, : "Foundations for microwave Engineering", McGraw-Hill Kogakusha International student Edition, 1966, pp.381-383.
8. Milton Abramowitz and Irene A. Stegun, : "Handbook of Mathamatical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical tables"; National Bureau of Standards Applied Mathematics Series. 55 Seventh Printing, May 1968., with correction. pp.355-415.
9. S. Silver, : "Microwave antenna theory and design", McGraw-Hill, 1949, pp.169.

10. R. Mittra, : "Numerical and Asymptotic techniques in Electromagnetics", Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 1975, pp.70, and pp.221.
11. Krass and Carver, : "Electromagnetics", second edition, McGraw-Hill Kogakusha. International student edition, 1973, pp.644.
12. M. Miya, : "Satellite Communications technology", KDD Engineering and consulting, Inc. Tokyo, Japan, 1981, pp.140-209.
13. P.J.B. Clarricoats, : "Some recent advances in microwave reflector antennas", proc. IEE, Vol.126, No.1, January 1979, pp.9-25.
14. PETER W. HANNAN, : "Microwave Antennas Derived from the Cassegrain Telescope", IRE Trans. Antennas Propagat; Vol.AP-9, pp.140-153. March 1961.
15. R.E. Collin and F.J. Zucker, : "Antenna Theory Part 2", McGraw-Hill, Inter-University Electromics Series, 1969, pp.48-54.

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ก.

การสร้างนิพจน์สำหรับสนามไฮบริดโหมด

ก.1 สมการของแมกซ์เวลล์สำหรับสื่อนำคลื่นแบบทรงกระบอก

สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กเป็นคำตอบของสมการเฮลมโฮลทซ์ (HELMHOLTZ EQUATION) ดังนี้

$$\nabla^2 \bar{E} + k^2 \bar{E} = 0, \quad \nabla^2 \bar{H} + k^2 \bar{H} = 0 \quad (1)$$

เนื่องจากสมการเฮลมโฮลทซ์สามารถแยกได้ (SEPARABLE) และพิจารณาให้มีคำตอบที่แน่นอนที่ประกอบสนามในแนวแกน ซึ่งแทนคลื่นที่ส่งผ่านไปทิศทาง z อยู่จริง ดังนั้นจึงสามารถแยกสนามทั้งหมดออกเป็นองค์ประกอบในแนวขวางและองค์ประกอบในแนวแกนได้ ทั้งนี้ไม่คิดการขึ้นต่อเวลาของสนามดังนี้

$$\bar{E} = (\bar{E}_t + \bar{a}_z E_z) \exp(-j\beta z), \quad \bar{H} = (\bar{H}_t + \bar{a}_z H_z) \exp(-j\beta z) \quad (2)$$

เมื่อ \bar{E}_t, \bar{H}_t เป็นองค์ประกอบของสนามในแนวขวาง

\bar{E}_z, \bar{H}_z เป็นองค์ประกอบของสนามในแนวแกน

และแยกโอเปอเรเตอร์เดลได้ดังนี้

$$\nabla = \nabla_t + \nabla_z = \nabla_t - j\beta \bar{a}_z \quad (3)$$

เมื่อ ∇_t เป็นส่วนของโอเปอเรเตอร์เดลในแนวขวาง

และ
$$\nabla_z = \bar{a}_z \frac{\partial}{\partial z}$$

ดังนั้นจากสมการของแมกซ์เวลล์ สามารถเขียนให้สอดคล้องกับสื่อนำคลื่นแบบทรงกระบอกได้ดังนี้

$$\nabla_t \times \bar{E}_t = -j\omega \mu \bar{a}_z H_z \quad (4)$$

$$\nabla_t \times \bar{a}_z E_z - j\beta \bar{a}_z \times \bar{E}_t = -\bar{a}_z \times \nabla_t E_z - j\beta \bar{a}_z \times \bar{E}_t = -j\omega \mu \bar{H}_t \quad (5)$$

$$\nabla_t \times \bar{H}_t = j\omega\epsilon\bar{a}_z E_z \quad (6)$$

$$\bar{a}_z \times \nabla_t H_z + j\beta\bar{a}_z \times \bar{H}_t = -j\omega\epsilon\bar{E}_t \quad (7)$$

$$\nabla_t \cdot \bar{H}_t = j\beta H_z \quad (8)$$

$$\nabla_t \cdot \bar{E}_t = j\beta E_z \quad (9)$$

หมายเหตุ รายละเอียดดูจาก R.E. COLLIN, "FOUNDATIONS FOR MICROWAVE ENGINEERING", McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1966 หน้า 65 ถึง 67

ก.2 การหาโหมดสำหรับคลื่นไฮบริด (HYBRID WAVE) ในท่อนำคลื่น

ต่อไปนี้เป็นกรณำสมการของแมกซ์เวลล์สำหรับสิ่งนำคลื่นแบบทรงกระบอก จากหัวข้อ ก.1 มาจัดใหม่เพื่อหาโหมดแสดงความสัมพันธ์ของคลื่นไฮบริดในท่อนำคลื่นดังนี้

1) หา \bar{E}_t ในเทอมของ $\nabla_t E_z$ และ $\nabla_t H_z$

$$\text{จากสมการ (7)} \quad \bar{E}_t = -\frac{1}{j\omega\epsilon} (\bar{a}_z \times \nabla_t H_z + j\beta\bar{a}_z \times \bar{H}_t) \quad (10)$$

และจากสมการ (5) เขียนสมการ (10) ได้ดังนี้

$$\bar{E}_t = -\frac{1}{j\omega\epsilon} \left\{ \bar{a}_z \times \nabla_t H_z + j\beta\bar{a}_z \times \left\{ -\frac{1}{j\omega\mu} (\nabla_t \times \bar{a}_z E_z - j\beta\bar{a}_z \times \bar{E}_t) \right\} \right\}$$

$$\text{จะได้} \quad \bar{E}_t = \left(\frac{-j\beta}{\omega^2\epsilon\mu - \beta^2} \right) (\nabla_t E_z - \frac{\omega\mu}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t H_z) \quad (11)$$

2) หา \bar{H}_t ในเทอมของ $\nabla_t E_z$ และ $\nabla_t H_z$

$$\text{จากสมการ (5)} \quad \bar{H}_t = -\frac{1}{j\omega\mu} (-\bar{a}_z \times \nabla_t E_z - j\beta\bar{a}_z \times \bar{E}_t) \quad (12)$$

และจากสมการ (7) เขียนสมการ (12) ได้ดังนี้

$$\bar{H}_t = -\frac{1}{j\omega\mu} \left\{ -\bar{a}_z \times \nabla_t E_z - j\beta\bar{a}_z \times \left\{ -\frac{1}{j\omega\epsilon} (\bar{a}_z \times \nabla_t H_z + j\beta\bar{a}_z \times \bar{H}_t) \right\} \right\}$$



$$\text{จะได้ } \bar{H}_t = \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \left(\frac{\omega \epsilon}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t E_z + \nabla_t H_z \right) \quad (13)$$

3) หา $\nabla_t E_z$ ในเทอมของ \bar{E}_t และ \bar{H}_t

$$\text{จากสมการ (5)} \quad -\bar{a}_z \times \nabla_t E_z - j\beta \bar{a}_z \times \bar{E}_t = -j\omega \mu \bar{H}_t$$

$$\text{จะได้ } \nabla_t E_z = -j\beta \bar{E}_t - j\omega \mu \bar{a}_z \times \bar{H}_t \quad (14)$$

4) หา $\nabla_t H_z$ ในเทอมของ \bar{E}_t และ \bar{H}_t

$$\text{จากสมการ (7)} \quad \bar{a}_z \times \nabla_t H_z + j\beta \bar{a}_z \times \bar{H}_t = -j\omega \epsilon \bar{E}_t$$

$$\text{จะได้ } \nabla_t H_z = -j\beta \bar{H}_t + j\omega \epsilon \bar{a}_z \times \bar{E}_t \quad (15)$$

สรุป สมการ (11), (13), (14) และ (15) แสดงความสัมพันธ์ของคลื่นไฮบริดในท่อนำคลื่น

ก.3 การหาสมการสำหรับองค์ประกอบของสนามในแนวขวางและองค์ประกอบสนามในแนวแกน

ต่อไปนี้เป็นกรณำสมการแมกซ์เวลล์ในหัวข้อ ก.1 และความสัมพันธ์ของคลื่นไฮบริดในท่อนำคลื่นในหัวข้อ ก.2 มาจัดใหม่เพื่อหาสมการหลักสำหรับสนามไฮบริดในสิ่งนำคลื่นทรงกระบอกทั่วไป

1) สมการสำหรับองค์ประกอบสนาม \bar{E}_t

$$\text{จากสมการ (14)} \quad \nabla_t E_z = -j\beta \bar{E}_t - j\omega \mu \bar{a}_z \times \bar{H}_t \quad (16)$$

จากสมการ (9) ให้กระทำโดยโอเปอเรเตอร์ ∇_t

$$\nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{E}_t) = -j\beta \nabla_t E_z$$

$$\text{จะได้ } \nabla_t E_z = \frac{1}{j\beta} \nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{E}_t) \quad (17)$$

แทนสมการ (17) ในสมการ (16)

จะได้
$$\nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{E}_t) = \beta^2 \bar{E}_t + \beta \omega \bar{a}_z \times \bar{H}_t \quad (18)$$

จากสมการ (4) ให้กระทำโดยโอเปอเรเตอร์ $\nabla_t \times$

$$\nabla_t \times \nabla_t \times \bar{E}_t = j\omega \bar{a}_z \times \nabla_t H_z \quad (19)$$

เอาสมการ (18) ลบสมการ (19) จะได้

$$\nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{E}_t) - \nabla_t \times \nabla_t \times \bar{E}_t = \beta^2 \bar{E}_t + \beta \omega \bar{a}_z \times \bar{H}_t - j\omega \bar{a}_z \times \nabla_t H_z$$

จัดเทอมใหม่ได้ดังนี้

$$\nabla_t^2 \bar{E}_t + (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) \bar{E}_t = \bar{0} \quad (20)$$

2) สมการสำหรับองค์ประกอบสนาม \bar{H}_t

จากสมการ (15)
$$\nabla_t H_z = -j\beta \bar{H}_t + j\omega \epsilon \bar{a}_z \times \bar{E}_t \quad (21)$$

จากสมการ (8) ให้กระทำโดยโอเปอเรเตอร์ ∇_t

$$\nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{H}_t) = j\beta \nabla_t H_z$$

จะได้
$$\nabla_t H_z = \frac{1}{j\beta} \nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{H}_t) \quad (22)$$

แทนสมการ (22) ในสมการ (21)

จะได้
$$\nabla_t (\nabla_t \cdot \bar{H}_t) = \beta^2 \bar{H}_t - \beta \omega \epsilon \bar{a}_z \times \bar{E}_t \quad (23)$$

จากสมการ (6) ให้กระทำโดยโอเปอเรเตอร์ $\nabla_t \times$

$$\nabla_t \times \nabla_t \times \bar{H}_t = -j\omega \epsilon \bar{a}_z \times \nabla_t H_z \quad (24)$$

เอาสมการ (23) ลบสมการ (24) จะได้

$$\nabla_t(\nabla_t \cdot \bar{H}_t) - \nabla_t \times \nabla_t \times \bar{H}_t = \beta^2 \bar{H}_t - \beta \omega \epsilon \bar{a}_z \times \bar{E}_t + j \omega \epsilon \bar{a}_z \times \nabla_t E_z$$

ใช้เอกลักษณ์ $\nabla(\nabla \cdot \bar{A}) - \nabla \times \nabla \times \bar{A} = \nabla^2 \bar{A}$ และสมการ (5) แล้วจัดเทอมใหม่

$$\nabla_t^2 \bar{H}_t + (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) \bar{H}_t = \bar{0} \quad (25)$$

3) สมการสำหรับองค์ประกอบสนาม E_z

$$\text{จากสมการ (11)} \quad \bar{E}_t = \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) (\nabla_t E_z - \frac{\omega \mu}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t H_z) \quad (26)$$

จากสมการ (26) ให้กระทำโดยโอเปอเรเตอร์ ∇_t .

$$\nabla_t \cdot \bar{E}_t = \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t E_z \right\} - \nabla_t \cdot \left\{ \frac{\omega \mu}{\beta} \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \bar{a}_z \times \nabla_t H_z \right\} \quad (27)$$

$$\text{จากสมการ (9)} \quad \nabla_t \cdot \bar{E}_t = j\beta E_z \quad (28)$$

แทนสมการ (28) ในสมการ (27) และจัดสมการใหม่จะได้

$$E_z = -\nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t E_z \right\} + \frac{\omega}{\beta} \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{\mu}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \bar{a}_z \times \nabla_t H_z \right\} \quad (29)$$

คูณสมการ (29) ตลอดด้วย $\frac{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2}{\mu}$ และจัดให้ทางขวามือของสมการเป็นศูนย์

$$\begin{aligned} \left(\frac{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2}{\mu} \right) \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t E_z \right\} - \left\{ \left(\frac{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2}{\mu} \right) \nabla_t \left(\frac{\mu}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \right\} \left(\frac{\omega}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t H_z \right) \\ + \left(\frac{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2}{\mu} \right) E_z = 0 \end{aligned} \quad (30)$$

$$\text{โดยที่ } \nabla_t \{ \ln \phi(r, \theta) \} = i \frac{\partial}{\partial r} \ln \phi + j \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \ln \phi = i \frac{1}{\phi} \frac{\partial \phi}{\partial r} + j \frac{1}{\phi r} \frac{\partial \phi}{\partial \theta} = \frac{1}{\phi} \nabla_t \phi$$

ใช้ความสัมพันธ์นี้กับสมการ (30) จะได้ว่า

$$(\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t E_z \right\} - \nabla_t \left\{ \ln \left(\frac{\mu}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \right\} \left(\frac{\omega \mu}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t H_z \right) + (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) \bar{E}_t = 0 \quad (31)$$

4) สมการสำหรับองค์ประกอบสนาม H_z

$$\text{จากสมการ (13)} \quad \bar{H}_t = \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \left(\frac{\omega \epsilon}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t E_z + \nabla_t H_z + \nabla_t H_z \right) \quad (32)$$

จากสมการ (32) ให้กระทำโดยโอเปอเรเตอร์ ∇_t .

$$\nabla_t \cdot \bar{H}_t = \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t H_z \right\} + \nabla_t \cdot \left\{ \frac{\omega \epsilon}{\beta} \left(\frac{-j\beta}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \bar{a}_z \times \nabla_t E_z \right\} \quad (33)$$

$$\text{จากสมการ (8)} \quad \nabla_t \cdot \bar{H}_t = j\beta H_z \quad (34)$$

แทนสมการ (34) ในสมการ (33) และจัดสมการใหม่จะได้

$$H_z = \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t H_z \right\} + \frac{\omega}{\beta} \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{\epsilon_0}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \bar{a}_z \times \nabla_t E_z \right\} \quad (35)$$

คูณสมการ (35) ตลอดด้วย $\frac{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2}{\epsilon}$ และจัดให้ทางขวามือของสมการเป็นศูนย์ จะได้ว่า

$$(\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) \nabla_t \cdot \left\{ \left(\frac{1}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \nabla_t H_z \right\} + \nabla_t \cdot \left\{ \ln \left(\frac{\epsilon}{\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2} \right) \right\} \left(\frac{\omega \epsilon}{\beta} \bar{a}_z \times \nabla_t E_z \right) + (\omega^2 \epsilon \mu - \beta^2) = 0 \quad (36)$$

สรุป สมการ (20), (25) และสมการ (31), (36) เป็นสมการสำหรับองค์ประกอบสนามในแนวขวางและแนวแกนตามลำดับ

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ข.

การหาค่าประกอบสนามในท่อนำคลื่นและในบริเวณสลีต

ภาคผนวก ข. เป็นการหาค่าประกอบสนามในท่อนำคลื่นและในบริเวณสลีต โดยในหัวข้อ ข.1 จะแสดงการนำสมการสำหรับองค์ประกอบในแนวแกนจากหัวข้อ ก.3 มาแก้สมการหาค่าประกอบสนาม E_z และ H_z จากนั้นในหัวข้อ ข.2 จะแสดงการนำคำตอบที่ได้นี้ และสมการสำหรับองค์ประกอบสนามในแนวขวางจากหัวข้อ ก.3 มาหาค่าประกอบสนามที่เหลือต่อไป สุดท้ายในหัวข้อ ข.3 จะแสดงการสร้างคำตอบสำหรับองค์ประกอบสนามในสลีตจากอนุกรมฟูเรียร์

ข.1 การหาค่าประกอบสนามในแนวแกนและการประยุกต์ทฤษฎีของฟลอเกท์

จากสมการ (31) และ (36) ภาคผนวก ก. เมื่อช่องว่างภายในท่อนำคลื่นเป็นอวกาศอิสระ จึงกำหนดได้ว่า $\epsilon = \epsilon_0$ และ $\mu = \mu_0$ และสมการ (17) และ (23) นี้จะกลายเป็น

$$\nabla_t^2 E_z + (\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2) E_z = 0 \quad (1 ก)$$

$$\nabla_t^2 H_z + (\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2) H_z = 0 \quad (1 ข)$$

พิจารณาสมการ (1 ก) และ (1 ข) ในแกนประสานทรงกระบอกกลมโดยที่ $E_z = E_z(r, \theta)$

และ $H_z = H_z(r, \theta)$ สมการ (1 ก) และ (1 ข) จะกลายเป็น

$$\frac{\partial^2 E_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 E_z}{\partial \theta^2} + (\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2) E_z = 0 \quad (2 ก)$$

$$\frac{\partial^2 H_z}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial H_z}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 H_z}{\partial \theta^2} + (\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2) H_z = 0 \quad (2 ข)$$

ตามทฤษฎีของฟลอเกท์ สามารถแทนสนาม E_z ในโครงสร้างแบบรายคาบด้วยรูปแบบดังนี้

$$E_z(r, \theta, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} f_m(r, \theta) \exp(-j\beta_m z) \quad (3)$$

$$\text{เมื่อ } \beta_m = \beta + 2m\pi/D$$

เราต้องการหา $f_n(r, \theta)$ ซึ่งทำได้โดยแทนอนุกรมนี้ในสมการ (2 ก) แล้วจัดรูปสมการใหม่จะได้

$$\sum_{n=-\infty}^{\infty} \exp(-j\beta_m z) \left\{ \frac{\partial^2}{\partial r^2} f_n(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} f_n(r, \theta) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} f_n(r, \theta) + (\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta_m^2) f_n(r, \theta) \right\} = 0$$

ดังนั้น $f_n(r, \theta)$ เป็นคำตอบของสมการ

$$\frac{\partial^2}{\partial r^2} f_n(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} f_n(r, \theta) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} f_n(r, \theta) + (\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta_m^2) f_n(r, \theta) = 0 \quad (4)$$

สมการ (4) เป็นสมการพาร์เซียลดิฟเฟอเรนเชียลอันดับที่สองแบบเชิงเส้นเอกพันธ์ ดังนั้นผลคูณของคำตอบ $R(r)Q(\theta)$ เป็นจริงสำหรับ $f_n(r, \theta)$ จากสมการ (4) จะได้ว่า

$$R''Q + \frac{1}{r} R'Q + \frac{1}{r^2} RQ'' + k_{cm}^2 RQ = 0$$

$$\text{เมื่อ } k_{cm}^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta^2$$

คูณตลอดด้วย r^2/RQ จะได้ว่า

$$r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + \frac{Q''}{Q} + r^2 k_{cm}^2 = 0$$

$$r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + r^2 k_{cm}^2 = -\frac{Q''}{Q} = v^2$$

เมื่อ v^2 เป็นค่าคงตัวของการแยกสมการ

ดังนั้นสามารถเขียนสมการได้ในรูป

$$r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + (k_{cm}^2 - \frac{v^2}{r^2}) r^2 = 0 \quad (5)$$

$$\text{และ } Q'' + Qv^2 = 0 \quad (6)$$

ในทำนองเดียวกันจากสมการ (2 ข) ตามทฤษฎีของฟลอเกท์ เมื่อแทนสนาม H_z ในรูปแบบ

$$H_z(r, \theta, z) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} g_n(r, \theta) \exp(-j\beta_m z)$$

และเขียน $g_n(r, \theta)$ ในรูปของผลคูณคำตอบ $g_n(r, \theta) = M(r)N(\theta)$

และให้ ξ เป็นค่าคงตัวของการแยกสมการ

$$r^2 \frac{M''}{M} + r \frac{M'}{M} + (k_{cm}^2 - \frac{\xi^2}{r^2}) r^2 = 0 \quad (7)$$

$$\text{และ} \quad N'' + N\xi^2 = 0 \quad (8)$$

สมการ (6) เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลธรรมดาอันดับที่สอง

$$Q'' + Qv^2 = 0$$

$$\text{จะมีคำตอบเป็น} \quad Q = A \cos v \theta + B \sin v \theta \quad (9)$$

เมื่อ A, B เป็นค่าคงตัวใดๆ

ดังนั้นสนามในท่อนำคลื่นเป็นรายคาบของ θ ด้วยความเร็วเชิงมุม ω ระยะคาบ 2π และเนื่องจากสมการ (6) เป็นสมการดิฟเฟอเรนเชียลธรรมดาอันดับที่สองแบบเชิงเส้นเอกพันธ์ ดังนั้นสามารถใช้หลักการการทับซ้อน (PRINCIPLE OF SUPERPOSITION) ได้โดยการแทนคลื่น Q ด้วยฟังก์ชันคาบของฮาร์มอนิกของมัน เมื่อเป็นเช่นนั้น v ต้องเป็นจำนวนเต็มบวก (n)

ดังนั้นจากสมการ (5) จะเป็นสมการของเบสเซลอันดับที่ n

$$r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + (k_{cm}^2 - \frac{n^2}{r^2}) r^2 = 0$$

$$R'' + \frac{1}{r} R' + (k_{cm}^2 - \frac{n^2}{r^2}) R = 0 \quad (10)$$

มีคำตอบเป็น $J_n(k_{cm} r)$ และ $Y_n(k_{cm} r)$

จะพบว่า $Y_n(k_{cm} r) = -\infty$ ที่ $r = 0$ เพราะฉะนั้น $J_n(k_{cm} r)$ เท่านั้นที่เป็นคำตอบที่เป็นไปได้ในทางกายภาพ จะได้ว่าคำตอบสุดท้ายสำหรับ E_z คือ

$$E_z(r, \theta, z) = \sum_n A_n \cos(n \theta) J_n(k_{cm} r) \exp(-j\beta_m z) ; m = 0, 1, 2, \dots \quad (11)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

ในทำนองเดียวกัน

$$H_z(r, \theta, z) = \sum_{\substack{m \\ n}} B_m \sin(n \theta) J_n(k_{cm} r) \exp(-j\beta_m z) ; m = 0, 1, 2, \dots \quad (12) \\ n = 0, 1, 2, \dots$$

ข.2 การหาคำตอบไฮบริดโหมดในท่อนำคลื่นแบบคอร์รูเกต

จากสมการ (11) และสมการ (12)

$$E_z = \sum_{\substack{m \\ n}} A_m \cos(n \theta) J_n(k_{cm} r) \exp(-j\beta_m z) ; m = 0, 1, 2, \dots \quad (13) \\ n = 0, 1, 2, \dots$$

$$H_z = \sum_{\substack{m \\ n}} B_m \sin(n \theta) J_n(k_{cm} r) \exp(-j\beta_m z) ; m = 0, 1, 2, \dots \quad (14) \\ n = 0, 1, 2, \dots$$

และจากสมการ (11) ในภาคผนวก ก. เขียนได้ในรูป

$$\vec{E}_t = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) (\nabla_t E_z - \frac{\omega \mu_o}{\beta} \vec{a}_z \times \nabla_t H_z) \quad (15)$$

แทนค่าสมการ (13) และ (14) ใน (15) และจัดรูปสมการใหม่

$$\vec{E}_t = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left\{ \vec{a}_r \sum_{\substack{m \\ n}} A_m k_{cm} \cos(n \theta) j'_n(k_{cm} r) + \vec{a}_\theta \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{\substack{m \\ n}} n A_m (-\sin(n \theta)) J'_n(k_{cm} r) \right. \\ \left. - \frac{\omega \mu_o}{\beta_m} k_{cm} \vec{a}_\theta \sum_{\substack{m \\ n}} B_m \sin(n \theta) J'_n(k_{cm} r) - \left(-\vec{a}_r \right) \frac{\omega \mu_o}{\beta_m} \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{\substack{m \\ n}} n B_m \cos(n \theta) J'_n(k_{cm} r) \right\}$$

จะได้

$$E_r(r, \theta) = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left\{ k_{cm} \sum_{\substack{m \\ n}} A_m \cos(n \theta) J'_n(k_{cm} r) \right. \\ \left. + \frac{\omega \mu_o}{\beta_m} \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{\substack{m \\ n}} n B_m \cos(n \theta) J'_n(k_{cm} r) \right\} \quad (16)$$

$$E_\theta(r, \theta) = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left\{ \frac{1}{r} \sum_{\frac{m}{n}} n A_m (-\sin(n \theta)) J_n(k_{cm} r) - \frac{\omega \mu_o k_{cm}}{\beta_m} \sum_{\frac{m}{n}} B_m \sin(n \theta) J'_n(k_{cm} r) \right\} \quad (17)$$

จากสมการ (13) ภาคผนวก ก.

$$H_t = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) (\nabla_t H_z + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} \bar{a}_z \times \nabla_t E_z) \quad (18)$$

แทนค่าสมการ (13) และ (14) ใน (18) และจัดรูปสมการใหม่

$$\begin{aligned} \bar{H}_t = & \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left\{ \bar{a}_r \sum_{\frac{m}{n}} B_m \sin(n \theta) J'_n(k_{cm} r) + \bar{a}_\theta \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{\frac{m}{n}} n B_m \cos(n \theta) J_n(k_{cm} r) \right. \\ & \left. + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} \bar{a}_\theta \sum_{\frac{m}{n}} A_m \cos(n \theta) J'_n(k_{cm} r) + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta} (-\bar{a}_r) \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{\frac{m}{n}} n A_m (-\sin(n \theta)) J_n(k_{cm} r) \right\} \end{aligned}$$

$$H_r = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left\{ \sum_{\frac{m}{n}} B_m \sin(n \theta) J'_n(k_{cm} r) + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta} \left(\frac{1}{r} \right) \sum_{\frac{m}{n}} n A_m \sin(n \theta) J_n(k_{cm} r) \right\} \quad (19)$$

$$H_\theta = \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left\{ \frac{1}{r} \sum_{\frac{m}{n}} n B_m \cos(n \theta) J_n(k_{cm} r) + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta} \sum_{\frac{m}{n}} A_n \cos(n \theta) J'_n(k_{cm} r) \right\} \quad (20)$$

สรุป สมการ (13), (16), (17) และสมการ (14), (19), (20) เป็นองค์ประกอบสนามไฟฟ้าและองค์ประกอบสนามแม่เหล็กในท่อนำคลื่น

ข.3 การพิจารณาสนามในบริเวณสล๊อต

1) การหาอนุกรมแทนองค์ประกอบสนามในแนวแกน

อนุกรมที่แทน E_z ภายในบริเวณสล๊อตของโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นคาบ เราจะแสดง E_z โดยที่ $E_r = 0$ ที่ $z = 0$ และ S และ $E_\theta = 0$ ที่ $z = 0$ และ S และ $r = b$ ถ้า $E_z(r, \theta, z)$ เป็นสนามภายในสล๊อต ($z = 0$ ถึง $z = S$ และ $r = a$ ถึง $r = b$) จะได้ว่าสนามในสล๊อตที่ n เริ่มต้นที่ $z = nD$ จะเป็น $\exp(-j\beta_n D) E_z(r, \theta, z - nD)$ ในกรณีรวมสเปซฮาร์โมนิกด้วยตามทฤษฎีของฟลอเกต์ ดังนั้นในกรณีที่เรา



เน้นเพียงคาบเดียว จะได้อนุกรมแทน E_z ที่เหมาะสมคือ

$$E_z(r, \theta, z) = \sum_{\ell} g_{\ell}(r, \theta) \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right); \quad \ell = 0, 1, 2, \dots \quad (21)$$

เพราะ $\frac{d}{dz} \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right)$ เป็นศูนย์ที่ $z = 0$ และ $z = S$

แทนอนุกรมนี้ในสมการ (2 ก) และจัดเทอมใหม่จะได้ว่า

$$\sum_{\ell} \left| \frac{\partial^2}{\partial r^2} g_{\ell}(r, \theta) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} g_{\ell}(r, \theta) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2}{\partial \theta^2} g_{\ell}(r, \theta) + \{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (\frac{\ell\pi}{S})^2\} g_{\ell}(r, \theta) \right| = 0$$

โดยที่คำตอบผลคูณ $g_{\ell}(r, \theta) = R(r)Q(\theta)$ จะได้

$$Q(\theta)R''(r) + Q(\theta) \frac{1}{r} R'(r) + \frac{R(r)}{r^2} Q''(\theta) + \{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (\frac{\ell\pi}{S})^2\} R(r)Q(\theta) = 0$$

คูณตลอดด้วย $\frac{r^2}{Q(\theta)R(r)}$ จะได้ว่า

$$r^2 \frac{R''(r)}{R(r)} + r \frac{R'(r)}{R(r)} + \frac{Q''(\theta)}{Q(\theta)} + r^2 \{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (\frac{\ell\pi}{S})^2\} = 0 \quad (22)$$

$$r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + r \{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - (\frac{\ell\pi}{S})^2\} = -\frac{Q''}{Q} = \zeta \quad (23)$$

เมื่อ ζ เป็นค่าคงตัวแยกสมการ

$$\text{ดังนั้นจะได้ว่า} \quad Q'' + \zeta Q = 0 \quad (24)$$

$$\text{ซึ่งมีคำตอบเป็น} \quad Q = A \cos(\zeta \theta) \quad (25)$$

$$\text{และ} \quad r^2 \frac{R''}{R} + r \frac{R'}{R} + (k_{\ell}^2 - \frac{\zeta}{r^2}) r^2 = 0 \quad (26)$$

$$\text{ซึ่งมีคำตอบเป็น} \quad R = C_{\ell} J_{\zeta}(k_{\ell} r) + D_{\ell} Y_{\zeta}(k_{\ell} r) \quad (27)$$

จะเห็นได้สำหรับปัญหาที่พิจารณาอยู่นี้จากสมการ (25) คำตอบที่เป็นไปได้ในทางกายภาพเมื่อ ζ เป็นจำนวนเต็มบวก ($\zeta = n$)

เพราะฉะนั้น

$$E_z = \sum_{\ell} \cos(n \theta) |C_{\ell} J_{\ell}(k_{\ell} r) + D_{\ell} Y_{\ell}(k_{\ell} r)| \cos\left(\frac{\ell \pi z}{S}\right); \ell = 0, 1, 2, \dots \quad (28)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

ในทำนองเดียวกันสำหรับอนุกรมของ H_z ภายในสล๊อต สำหรับโครงสร้างที่เป็นรายคาบแสดง H_z โดยที่ $H_r = 0$ ที่ $r = b$ และ $H_z = 0$ ที่ $z = 0$ และ S เพราะฉะนั้น อนุกรมที่ใช้แทน H_z ที่เหมาะสมคือ

$$H_z = \sum_{\ell} h_{\ell}(r, \theta) \sin \frac{\ell \pi z}{S} = 0 \quad (29)$$

2) องค์ประกอบสนามในบริเวณสล๊อต

ในทางทฤษฎีสมมุติว่าสนามในบริเวณสล๊อตเกิดขึ้นเนื่องจากการแพร่ของสนามตามแนวรัศมี (RADIAL MODE). โดยเราจะไม่นำเอาโหมดที่มีอันดับสูงๆ มาพิจารณา กำหนดให้ความกว้างของสล๊อตเล็กมากเมื่อเทียบกับความยาวคลื่น λ_0 ด้วยเหตุนี้ $\frac{\partial}{\partial z} = 0$ และสมการที่ควรจะเป็นคือ $\nabla_t^2 E_z + k_0^2 E_z = 0$ โดย E_z ได้จากอนุกรมตามสมการ (28) ดังนั้นจะได้ว่า

$$E_z = \sum_{\ell} \{C_{\ell} J_{\ell}(k_{\ell} r) + D_{\ell} Y_{\ell}(k_{\ell} r)\} \cos(n \theta) \cos\left(\frac{\ell \pi z}{S}\right); \ell = 0, 1, 2, \dots \quad (30)$$

$$n = 0, 1, 2, \dots$$

$$E_r = 0 \quad (31)$$

$$E_{\theta} = 0 \quad (32)$$

จากอนุกรมที่เหมาะสมของ H_z ที่ $z = 0$ และ $z = S$ จะได้ว่า

$$H_z = 0 \quad (33)$$

หา H_r, H_{θ} ได้จากสมการแมกซ์เวลล์ดังนี้

$$\nabla \times E = \bar{a}_r \left(\frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - \frac{\partial E_{\theta}}{\partial z} \right) + \bar{a}_{\theta} \left(\frac{\partial E_z}{\partial z} - \frac{\partial E_r}{\partial r} \right) + \bar{a}_z \left| \frac{1}{r} \frac{\partial r E_{\theta}}{\partial r} - \frac{1}{r} \frac{\partial E_r}{\partial \theta} \right| = -j\omega \mu_0 H$$

$$\begin{aligned} \bar{a}_r \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} - \bar{a}_\theta \frac{\partial E_z}{\partial r} &= -j\omega\mu_0 \bar{H} \\ &= -j\omega\mu_0 |H_r \bar{a}_r + H_\theta \bar{a}_\theta| \end{aligned}$$

เพราะฉะนั้น

$$H_\theta = \frac{1}{j\omega\mu_0} \frac{\partial E_z}{\partial r} = \sum_{\ell} \frac{k_\ell}{j\omega\mu_0} \{C_\ell J_n(k_\ell r) + D_\ell Y_n(k_\ell r)\} \cos(n\theta) \cos \frac{\ell\pi z}{S} \quad (34)$$

$$H_r = \frac{-1}{j\omega\mu_0} \frac{1}{r} \frac{\partial E_z}{\partial \theta} = \sum_{\ell} \frac{n}{j\omega\mu_0} \{C_\ell J_n(k_\ell r) + D_\ell Y_n(k_\ell r)\} \sin(n\theta) \cos \frac{\ell\pi z}{S} \quad (35)$$

$$\text{เมื่อ} \quad k_\ell^2 = \omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \left(\frac{\ell\pi}{S}\right)^2$$

สรุป สมการ (30), (31), (32) และสมการ (33), (34), (35) เป็นองค์ประกอบสนามไฟฟ้าและองค์ประกอบสนามแม่เหล็กในบริเวณสล็อต

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก ค.

การสร้างสมการลักษณะสมบัติ

ค.1 พิจารณาองค์ประกอบสนามร่วมกับเงื่อนไขขอบเขตของท่อนำคลื่น

เงื่อนไขขอบเขตที่ระนาบ $r = a$ สนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็กในแนวสัมผัสระนาบ มีความต่อเนื่องครอบคลุมบริเวณ $r = a$, $0 \leq z \leq S$ และสนามไฟฟ้าในแนวสัมผัสระนาบ $r = a$ บริเวณ $S \leq z \leq D$ มีค่าเป็นศูนย์

1) สำหรับสนามไฟฟ้า

พิจารณา E_z ที่ $r = a$ จากสมการ (13) และ (30) ภาคผนวก ข.

$$\sum_m A_m \cos(n \theta) J_n(k_{cm} a) \exp(-j\beta_m z) = \begin{cases} \sum_n \{C_n J_n(k_n a) + D_n Y_n(k_n a)\} \cos(\frac{\ell\pi z}{S}); & 0 \leq z \leq S \\ 0 & S \leq z \leq D \end{cases} \quad (1)$$

พิจารณา E_z ที่ $r = b$ จากองค์ประกอบสนามในบริเวณสล็อต จากสมการ (30) ภาคผนวก ข.

$$D_n = \frac{-C_n J_n(k_n b)}{Y_n(k_n b)} \quad (2)$$

พิจารณา E_θ ที่ $r = a$, E_θ เป็นศูนย์ เนื่องจากขนานกับระนาบส่วนที่เป็นผิวโลหะ จากสมการ (17) และ (32) ภาคผนวก ข.

$$\sum_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta_m^2} \right) \left\{ -\frac{1}{a} n A_m J_n(k_{cm} a) - \frac{\omega \mu_0}{\beta_m} k_{cm} B_m J'_n(k_{cm} a) \right\} \sin(n \theta) \exp(-j\beta_m z) = 0$$

$$\text{เพราะฉะนั้น} \quad B_m = \frac{-n\beta_m A_m J_n(k_{cm} a)}{a \omega \mu_0 k_{cm} J'_n(k_{cm} a)} \quad (3)$$

เพราะฉะนั้นจากสมการ (1) จะได้ว่า

$$\sum_m A_m J_n(k_{cm} a) \exp(-j\beta_m z) = \begin{cases} \sum_n C_n \left\{ J_n(k_n a) - \frac{J_n(k_n b)}{Y_n(k_n b)} Y_n(k_n a) \right\} \cos(\frac{\ell\pi z}{S}); & 0 \leq z \leq S \\ 0 & S \leq z \leq D \end{cases} \quad (4)$$

2) สำหรับสนามแม่เหล็ก

พิจารณา H_θ ที่ $r = a$ จากสมการ (20) และ (34) ภาคผนวก ข.

$$\sum_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta_m^2} \right) \left\{ \frac{1}{a} n B_m J_n(k_{cm} a) + \frac{\omega \epsilon_0}{\beta_m} k_{cm} A_m J'_n(k_{cm} a) \right\} \cos(n\theta) \exp(-j\beta_m z)$$

$$= \sum_{\ell} \frac{k_\ell}{j\omega \mu_0} \{ C_\ell J_n(k_\ell a) + D_\ell Y_n(k_\ell a) \} \cos(n\theta) \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right) \quad (5)$$

เมื่อแทนค่าคงที่ D_ℓ, B_m จากสมการ (2), (3) ตามลำดับ ลงในสมการ (5) จะได้ว่า

$$\sum_m A_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_0 \mu_0 - \beta_m^2} \right) \left\{ -\frac{1}{a^2} \frac{n^2 \beta_m}{\omega \mu_0 k_{cm}} \frac{J_n^2(k_{cm} a)}{J'_n(k_{cm} a)} + \frac{\omega \epsilon_0}{\beta_m} k_{cm} J'_n(k_{cm} a) \right\} \exp(-j\beta_m z)$$

$$= \sum_{\ell} C_\ell \frac{k_\ell}{j\omega \mu_0} \left\{ J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right\} \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right) ; a \leq z \leq S \quad (6)$$

ค.2 การพิจารณาการแผ่สนามแม่เหล็กไฟฟ้า

1) พิจารณาการแผ่สนามไฟฟ้า

จากสมการ (4) คูณด้วย $\exp(-j\beta z)$ จะได้

$$\sum_m A_m J_n(k_{cm} a) \exp\left(\frac{-j2m\pi z}{D}\right) = \begin{cases} \sum_{\ell} C_\ell J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right) \exp(-j\beta z) ; 0 \leq z \leq S \\ = 0 ; S \leq z \leq D \end{cases} \quad (7)$$

สำหรับการแผ่สนามไฟฟ้าตอนนี้จะพบว่าในอนุกรมฟูเรียร์มีลักษณะยูนีค (UNIQUELY DETERMINED) เนื่องจากอนุกรมที่เราใช้แทนสนามนี้ถูกกำหนดในช่วงที่ครบบริบูรณ์ (COMPLETE INTERVAL) ของอนุกรมที่มีคุณสมบัติออร์ทอกอนอล พังก์ชัน $\exp(-j\beta_m z)$ เป็นออร์ทอกอนอล ในช่วง 0 ถึง D และด้วยเหตุนี้เนื่องจากค่านัยมือของสมการ (7) เป็นจริงได้สำหรับทุกค่าของ z ในช่วงคาบ 0 ถึง D ดังนั้นเราจึงสามารถได้มีพจน์ที่ยูนีคสำหรับ A_m ในเทอมของ C_ℓ จากสมการ (7) ซึ่งจะสังเกตเห็นได้ว่ากรณีดังกล่าวไม่เป็นจริงสำหรับสมการ (6) ซึ่งครอบคลุมค่า z ไว้ได้เพียงช่วง $0 \leq z \leq S$ เท่านั้น

หากคูณตลอดสมการ (7) ด้วย $\exp(ji2\pi z/D)$ (i เป็นเลขจำนวนเต็มบวก) แล้วอินทิเกรตจาก 0 ถึง D จะได้

$$\sum_{\substack{n \\ r}} D A_i J_n(k_{cr} a) = \sum_{\substack{n \\ \ell}} C_\ell \left\{ J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right\} \int_0^D \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right) \exp\left\{-j\left(\beta - \frac{2i\pi}{D}\right)z\right\} dz \quad (8)$$

หมายเหตุ 1) $\int_0^D \exp(-j2\pi z/D) (m-i) dz = \begin{cases} 0 & ; m \neq i \\ D & ; m = i \end{cases}$

2) สมการ (6) และ (8) แทนชุดของสมการอนันตพจน์ 2 ชุด ซึ่งแต่ละชุดขึ้นกับค่าของ i และ m

2) พิจารณาการแผ่หขสนามแม่เหล็ก

จากสมการ (6) ซึ่งเป็นการแผ่หขสนาม H_θ ในแนวสัมผัสระนาบ $r = a$ สังเกตว่าแม้ว่าสมการนี้ C_ℓ จะไม่ยูนิกสำหรับ A_m ก็ตามแต่ก็สามารถกำหนด C_ℓ ให้ยูนิกในเทอมของ A_m ได้ เพราะเรามี A_i ที่ยูนิกในเทอมของ C_ℓ อยู่แล้ว (ซึ่งจากหมายเหตุ จะเห็นได้ว่าจะเป็นระบบสมการที่สมบูรณ์ได้เมื่อ $i = m$) คือสมการ (8) ขจัดลักษณะคาบจาก 0 ถึง S ของ $\cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right)$ โดยใช้คุณสมบัติของฟังก์ชันออร์ทอกอนอล โดยการคูณสมการ (6) ด้วย $\cos\left(\frac{i\pi z}{S}\right)$ แล้วอินทิเกรตจาก 0 ถึง S จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{n \\ m}} A_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left(-\frac{1}{a^2} \frac{n^2 \beta_m}{\omega \mu_o k_{cm}} \frac{J_n^2(k_{cm} a)}{J_n'(k_{cm} a)} + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} k_{cm} J_n'(k_{cm} a) \right) \int_0^S \cos\left(\frac{i\pi z}{S}\right) \exp(-j\beta_m z) dz \\ = \sum_{\substack{n \\ \ell}} C_\ell \frac{k_\ell}{j\omega \mu_o} \left\{ J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right\} \int_0^S \cos\left(\frac{\ell\pi z}{S}\right) \cos\left(\frac{i\pi z}{S}\right) dz \\ = \sum_{\substack{n \\ \ell}} C_\ell \frac{k_\ell}{j\omega \mu_o} \left\{ J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right\} \frac{S}{\epsilon_o i} \quad (9) \end{aligned}$$

จากสมการ (8) และ (9) จะได้เป็นสมการอนันตพจน์ 2 ชุด โดย $m, i = 0, 1, 2, \dots, \infty$

3) สมการลักษณะสมบัติ

จากสมการ (8) จะได้

$$\sum_n D A_i J_n(k_{ci} a) = \sum_{\substack{\ell \\ n}} C_\ell \left\{ J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right\} \left\{ \frac{-j\beta_i |(-1)^\ell \exp(j\beta_i S) - 1|}{\beta_i^2 - \left(\frac{\ell\pi}{S}\right)^2} \right\} \quad (10)$$

จากสมการ (9) จะได้

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{\ell \\ n}} C_\ell \frac{S}{\epsilon_{oi}} \frac{k_\ell}{j\omega\mu_o} \left| J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right| \\ = \sum_{\substack{m \\ n}} A_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left(\frac{-1}{a^2} \frac{n^2 \beta_m}{\omega \mu_o k_{cm}} \frac{J_n^2(k_{cm} a)}{J_n'(k_{cm} a)} + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} k_{cm} J_n'(k_{cm} a) \right) \\ \left(\frac{-j\beta_m |1 - (-1)^i \exp(-j\beta_m S)|}{\beta_m^2 - \left(\frac{i\pi}{S}\right)^2} \right) \end{aligned} \quad (11)$$

แทน i ด้วย m จะได้ระบบสมการเชิงเส้นดังนี้

$$\sum_{\substack{m \\ n}} D A_m J_n(k_{cm} a) = \sum_{\substack{\ell \\ n}} C_\ell \left\{ J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right\} \left\{ \frac{-j\beta_m |(-1)^\ell \exp(-j\beta_m S) - 1|}{\beta_m^2 - \left(\frac{\ell\pi}{S}\right)^2} \right\} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \sum_{\substack{\ell \\ n}} C_\ell \frac{S}{\epsilon_{om}} \frac{k_\ell}{j\omega\mu_o} \left| J_n(k_\ell a) - \frac{J_n(k_\ell b)}{Y_n(k_\ell b)} Y_n(k_\ell a) \right| \\ = \sum_{\substack{m \\ n}} A_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left(\frac{-1}{a^2} \frac{n^2 \beta_m}{\omega \mu_o k_{cm}} \frac{J_n^2(k_{cm} a)}{J_n'(k_{cm} a)} + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} k_{cm} J_n'(k_{cm} a) \right) \\ \left(\frac{-j\beta_m |1 - (-1)^m \exp(-j\beta_m S)|}{\beta_m^2 - \left(\frac{m\pi}{S}\right)^2} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

ในแต่ละสลิตนั้นคลื่นที่ส่งผ่านภายในจะพิจารณาเฉพาะที่หน้าเมนทอลไม่คิดฮาร์มอนิก เฉพาะฉะนั้น

$\ell = 0$ และจากสมการ (12) และ (13) จะกลายเป็น

$$\sum_{\frac{m}{n}} D A_m J_n(k_{cm} a) = \sum_{\frac{m}{n}} C_o \left\{ J_n(k_o a) - \frac{J_n(k_o b)}{Y_n(k_o b)} Y_n(k_o a) \right\} \left\{ \frac{-j \exp(j\beta_m S)}{\beta_m} \right\} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \sum_n C_o \frac{S}{\epsilon_{om}} \frac{k_o}{j\omega\mu_o} \left\{ J_n(k_o a) - \frac{J_n(k_o b)}{Y_n(k_o b)} Y_n(k_o a) \right\} \\ = \sum_{\frac{m}{n}} A_m \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left(\frac{-1}{a^2} \frac{n^2 \beta_m}{\omega \mu_o k_{cm}} \frac{J_n^2(k_{cm} a)}{J_n'(k_{cm} a)} + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} k_{cm} J_n'(k_{cm} a) \right) \\ \cdot \left(\frac{-j\beta_m |1 - (-1)^m \exp(j\beta_m S)|}{\beta_m^2 - \left(\frac{m\pi}{S}\right)^2} \right) \end{aligned} \quad (15)$$

แทน A_m จากสมการ (14) ในสมการ (15) จะได้ว่า

$$\begin{aligned} \sum_n C_o \frac{S}{\epsilon_{om}} \frac{k_o}{j\omega\mu_o} \left\{ J_n(k_o a) - \frac{J_n(k_o b)}{Y_n(k_o b)} Y_n(k_o a) \right\} = \sum_{\frac{m}{n}} \left(\frac{1}{DJ_n(k_{cm} a)} \right) C_o \left\{ J_n(k_o a) - \frac{J_n(k_o b)}{Y_n(k_o b)} Y_n(k_o a) \right\} \\ \cdot \left\{ \frac{-j \exp(j\beta_m S)}{\beta_m} \right\} \left(\frac{-j\beta_m}{\omega^2 \epsilon_o \mu_o - \beta_m^2} \right) \left(\frac{-1}{a^2} \frac{n^2 \beta_m}{\omega \mu_o k_{cm}} \frac{J_n^2(k_{cm} a)}{J_n'(k_{cm} a)} + \frac{\omega \epsilon_o}{\beta_m} k_{cm} J_n'(k_{cm} a) \right) \\ \left(\frac{-j\beta_m (1 - (-1)^m \exp(-j\beta_m S))}{\beta_m^2 - \left(\frac{m\pi}{S}\right)^2} \right) \end{aligned} \quad (16)$$

สมการนี้ คือ สมการค่าไอเกนประมาณค่าครั้งที่หนึ่ง โดยคำนึงถึงผลอันเนื่องมาจากโครงสร้างที่เป็นรายคาบด้วย

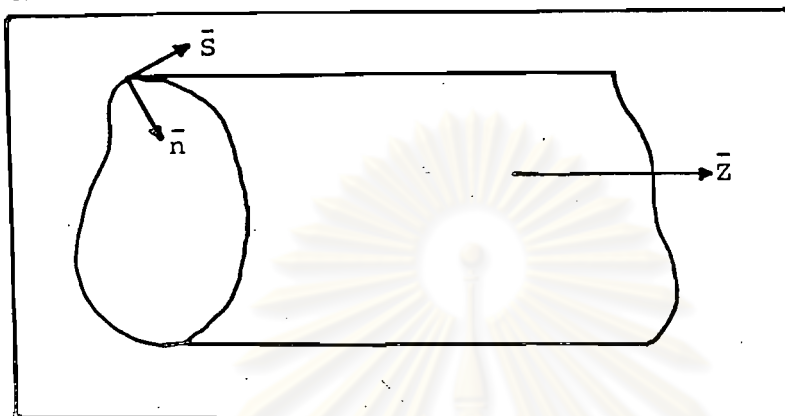
ในกรณีที่พิจารณาเฉพาะพื้นตาเมทาลิสเปซ คือ ให้สเปซฮาร์มอนิกเป็นศูนย์หมด (m คือจำนวนสเปซฮาร์มอนิก) และเนื่องจาก $m = 1$ จะให้ขั้วคลื่นที่ช่องเปิดเป็นแบบเชิงเส้นจะได้ว่า

$$\begin{aligned} \frac{J_1'(k_o a) Y_1(k_o b) - J_1(k_o b) Y_1'(k_o a)}{J_1(k_o a) Y_1(k_o b) - J_1(k_o b) Y_1(k_o a)} = \frac{S}{D} \frac{1}{k_o k_o k_{co}^2} \left(\frac{-\beta_o^2}{J_1'(k_{co} a)} \frac{J_1(k_{co} a)}{J_1'(k_{co} a)} + k_o \frac{J_1'(k_{co} a)}{J_1(k_{co} a)} \right) \\ \cdot \left(\frac{\sin \beta_o S/2}{\beta_o S/2} \right)^2 \end{aligned} \quad (17)$$

นี่คือสมการลักษณะสมบัติที่ต้องการ

ภาคผนวก ง.

ค่ารีแอกแตนซ์ที่ผิว



รูปที่ ง.1 ท่อนำคลื่นทรงกระบอก

ท่อนำคลื่นรูปทรงกระบอกกลมกลวงแสดงไว้ดังรูปที่ ง.1 องค์ประกอบสนามในแนวสัมผัสกับผิวที่นำคลื่น จะมีแนวสัมผัสทั้งในแนว s และแนว z สำหรับผิวสัมผัสคลื่นที่สร้างเป็นแบบคอรัจเกต คลื่นที่เคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนว s และแนว z จะมีคุณสมบัติต่างกัน กล่าวคือ ผิวสัมผัสนี้มีคุณสมบัติเป็นแอนไอโซทรอปิก (ANISOTROPIC) การอธิบายปรากฏการณ์ดังกล่าวมักจะกำหนดจากอัตราส่วนของ E ต่อ H ที่ผิว อิมพีแดนซ์ที่ผิวในแนวทั้งสองหาได้จากความสัมพันธ์ดังนี้

$$E_s = z_o z_{SA} H_z, \quad E_z = -z_o z_{SB} H_s \quad (1)$$

เมื่อ E_s, H_s เป็นองค์ประกอบสนามในแนวเส้นรอบวง

E_z, H_z เป็นองค์ประกอบสนามในแนวแกน

z_o เป็นอิมพีแดนซ์ของคลื่น มีค่าเท่ากับ 120π โอห์ม

z_{SA}, z_{SB} เป็นอิมพีแดนซ์ที่ผิวในแนวทั้งสอง เป็นค่าอิมพีแดนซ์เทียบกับ z_o

ซึ่งวิธีการกำหนดอิมพีแดนซ์ที่ผิวสามารถใช้คำนวณผลของเงื่อนไขที่ผิวต่อการส่งผ่านคลื่นในท่อนำคลื่นได้ โดย z_s เป็นฟังก์ชันของตำแหน่ง

สำหรับท่อนำคลื่นทรงกระบอกกลม สามารถกำหนดค่ารีแอดแตนซ์ที่ผิวได้ดังนี้

$$X_{\theta} = \frac{-jE_{\theta}(k_{cm} a)}{H_z(k_{cm} a) z_0}, \quad X_z = \frac{jE_z(k_{cm} a)}{H_z(k_{cm} a)} \quad (2)$$

เมื่อ $X_{s\theta}$ เป็นค่ารีแอดแตนซ์ที่ผิวตามแนวเส้นรอบวง

X_{sz} เป็นค่ารีแอดแตนซ์ที่ผิวตามแนวแกน

z_0 เป็นค่าอิมพีแดนซ์ของคลื่น มีค่าเท่ากับ 120π โอห์ม

$E_{\theta}(k_{cm} a)$, $H_{\theta}(k_{cm} a)$ เป็นองค์ประกอบสนามตามแนวเส้นรอบวง

$E_z(k_{cm} a)$, $H_z(k_{cm} a)$ เป็นองค์ประกอบสนามตามแนวแกน



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ภาคผนวก จ
รายการโปรแกรม

โปรแกรมที่ 1.1 และโปรแกรมที่ 1.2 ใช้สำหรับหาคุณสมบัติของการเปลี่ยนแปลงของการส่งผ่านคลื่น เมื่อความถี่เปลี่ยนไป

โปรแกรมที่ 2.1 และโปรแกรมที่ 2.2 ใช้สำหรับหาโลกซ์ของค่าศูนย์และโลกซ์ของค่าโพล สำหรับโหมด EH_{11}

โปรแกรมที่ 3 ใช้สำหรับหาการกระจายของสนามบนช่องเปิดของพีคฮอว์นที่ผนังภายในเป็นคอร์รูเกต

โปรแกรมที่ 4 ใช้สำหรับหาแพทเทิร์นการแผ่คลื่นของสายอากาศแบบคอร์รูเกต-พีคฮอว์น



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมที่ 1.1

```

5 REM THIS IS A PROGRAM FOR EVALUATE EXPRESSION OF RHS
8 REM OF CHARACTERISTIC EQUATION OF CORRUGATE W/G
10 OPEN "R",#1,"B:RDT4.BAS",8
20 FIELD #1, 8 AS J1A$,8 AS Y1A$,8 AS J1B$,8 AS Y1B$,8 AS DJ1$,8 AS DY1$
30 FOR LOOP=1 TO 23
40 KOA=0
50 KOA=LOOP*.5
60 GET #1,LOOP
70 J1A=CVD(J1A$)
80 Y1A=CVD(Y1A$)
85 LPRINT "S=",S,"D=",D,"A=",A
90 J1B=CVD(J1B$)
100 Y1B=CVD(Y1B$)
110 DJ1=CVD(DJ1$)
120 DY1=CVD(DY1$)
130 A=DJ1*Y1B
140 B=J1B*DY1
150 C=J1A*Y1B
160 D=J1B*Y1A
170 RHS=KOA*(A-B)/(C-D)
180 PRINT KOA,RHS
190 NEXT LOOP
200 CLOSE #1
210 END

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

โปรแกรมที่ 1.2

```

5 REM THIS IS A PROGRAM FOR EVALUATE EXPRESSION OF LHS
8 REM OF CHARACTERISTIC EQUATION OF CORRUGATE W/G
10 PRINT "THE VALUES OF S,D,A"
40 OPEN "R",#2,"B:JOC.DAT",B
50 FIELD #2,8 AS JOC$
60 OPEN "R",#3,"B:J1C.DAT",B
70 FIELD #3,8 AS J1C$
80 INPUT S,D,A
85 LPRINT "S=",S,"D=",D,"A=",A
90 KOA=0
100 KOA=KOA+.5
400 REM
410 KCA=.9
420 KCA=KCA+.1
430 Y=(KCA-.9)*10
440 GET #2,Y
450 JOC=CVD(JOC$)
460 GET #3,Y
470 J1C=CVD(J1C$)
475 IF KCA>KOA THEN 740
510 REM
520 DJ1C=JOC-J1C/KCA
530 M1=S*KOA
540 M2=D*KCA
550 M3=KOA^2
560 M4=KCA^2
570 M5=M3-M4
580 M6=SQR(M5)
590 M7=M6*S
600 M8=2*A
610 M0=M7/M8
620 SYNC=SIN(M0)/M0
630 F=M1/M2
640 J=-M5/M4
650 F=KOA*DJ1C/J1C
660 Q=(J/F)+F
670 W=SYNC^2
680 LHS=F*Q*W
700 LPRINT KOA,KCA,LHS,Q
730 GOTO 420
740 GOTO 100
760 CLOSE #2
770 CLOSE #3
780 END

```

โปรแกรมที่ 2.1

```

1 REM FIND THE VALUE OF ZEROS OF CROSS-PRODUCT FUNCTION
5 REM  $DJ*Y-DY*J$  WITH PARAMETER M WHERE  $M \geq 1$ 
8 REM OF CHARACTERISTIC EQUATION OF CORRUGATE W/G
10 REM WHERE H IS NUMBER OF ZEROS, VIS ORDER OF BESSEL FUNCTION.
15 REM IM IS INVERSE OF PARAMETER M OF CROSS-PRODUCT FUNCTION.
20 PRINT "THE VALUE OF S,V,IM"
25 LPRINT:LPRINT:LPRINT
30 INPUT S,V,IM
40 KOA=0
50  $U=4*V^2$ 
60  $M=1/IM$ 
70  $B1=(S-.5)*3.1416$ 
80  $B2=M-1$ 
85 LPRINT "S=",S,"D=",D,"A=",A
90  $B=B1/B2$ 
100  $F1=(U+3)$ 
110  $F2=(U-1)$ 
120  $F3=8*M*(M-1)$ 
130  $P=(F1-F2)/F3$ 
140  $D=P/B$ 
150  $Z1=B+P/B$ 
160  $Q1=(U^2+46*U-63)*M^3$ 
170  $Q2=(U-1)*(U-25)$ 
180  $Q3=6*(M-1)*(4*M)^3$ 
190  $Q=(Q1-Q2)/Q3$ 
200  $Z2=Z1+(Q-P^2)/B^3$ 
210  $R1=(U^3+185*U^2-2053*U+1899)*M^5$ 
220  $R2=(U-1)*(U^2-114*U+1073)$ 
230  $R3=5*(M-1)*(4*M)^5$ 
240  $R=(R1-R2)/R3$ 
250  $ZERO=Z2+(R-4*P*Q+2*P^3)/B^5$ 
260 LPRINT "V","S","IM","B","D","Z1","Z2","ZERO"
270 LPRINT V,S,IM,B,D,Z1,Z2,ZERO
280 GOTO 20
290 END

```

โปรแกรมที่ 2.2

```

10 REM FINDING POLES AND ZEROS OF THE CHARACTERISTIC EQUATION
20 REM BY INTERPOLATING FROM TABLE OF CROSS-PRODUCT BESSEL FUNCTION
30 REM ON PAGE 415 OF HANDBOOK OF MATHEMATICAL FUNCTIONS
40 REM EDITED BY ABRAMOWITZ
50 PRINT "THE VALUE OF U, V, TU, TV, A, B"
60 INPUT U, V, TU, TV, A, B
70 FU=(1/U-1)*TU
80 FV=(1/V-1)*TV
90 FOR X=A TO B STEP .01
100 F=(X-U)/(V-U)
110 F=(1-F)*FU+F*FV
120 R=F/(1/X-1)
130 LPRINT "U", "V", "TU", "TV", "A", "B"
140 LPRINT U, V, TU, TV, A, B
150 LPRINT "AOB=", X; LPRINT "KOA="; R
160 HOA=1/X-1
170 AOL=R/6.28318
180 LPRINT "HOA="; HOA; LPRINT "AOL="; AOL
190 LPRINT
200 LPRINT
210 NEXT X
220 GOTO 20
230 END

```

ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย



โปรแกรมที่ 3.

```
10 REM THIS IS A PROGRAM FOR FINDING THE APERTURE DIS-
15 REM TRIBUTIONS OF CORRUGATED FEED HORN.
20 DIM J(2,176),AY(2)
30 FOR M=1 TO 2
40 FOR N=0 TO 175
50 READ J(M,N)
60 NEXT N
70 NEXT M
80 DATA 1.00000,0.99750,0.99002,0.97763,0.96040
85 DATA 0.93847,0.91200,0.88120,0.84629,0.80752
90 DATA 0.76520,0.71962,0.67113,0.62009,0.56686
95 DATA 0.51183,0.44540,0.39798,0.33999,0.28182
100 DATA 0.22389,0.16661,0.11036,0.05554,0.00251
105 DATA -0.04838,-0.09680,-0.14245,-0.18504,-0.22431
110 DATA -0.26005,-0.29206,-0.32019,-0.34430,-0.36430
115 DATA -0.38013,-0.39177,-0.39923,-0.40256,-0.40183
120 DATA -0.39715,-0.38867,-0.37656,-0.36101,-0.34226
125 DATA -0.32054,-0.29614,-0.26933,-0.24043,-0.20974
130 DATA -0.17760,-0.14433,-0.11029,-0.07580,-0.04121
135 DATA -0.00684,0.02697,0.05992,0.09170,0.12203
140 DATA 0.15065,0.17729,0.20174,0.22381,0.24331
145 DATA 0.26009,0.27404,0.28506,0.29310,0.29810
150 DATA 0.30008,0.29905,0.29507,0.28822,0.27860
155 DATA 0.26634,0.25160,0.23456,0.21541,0.19436
160 DATA 0.17165,0.14752,0.12222,0.09601,0.06916
165 DATA 0.04194,0.01462,-0.01252,-0.03923,-0.26525
170 DATA -0.09033,-0.11424,-0.13675,-0.15766,-0.17677
175 DATA -0.19393,-0.20898,-0.22180,-0.23228,-0.24034
180 DATA -0.24594,-0.24903,-0.24962,-0.24772,-0.24337
185 DATA -0.23665,-0.22764,-0.21664,-0.20320,-0.18806
190 DATA -0.17119,-0.15277,-0.13299,-0.11207,-0.09021
195 DATA -0.06765,-0.04462,-0.02133,0.00197,0.02505
200 DATA 0.04769,0.06967,0.09077,0.11080,0.12956
205 DATA 0.14688,0.16261,0.17659,0.18870,0.19884
210 DATA 0.20693,0.21289,0.21669,0.21830,0.21773
215 DATA 0.21499,0.21013,0.20322,0.19434,0.18385
220 DATA 0.17107,0.15695,0.14137,0.12449,0.10648
225 DATA 0.08754,0.06786,0.04764,0.02708,0.00639
230 DATA -0.01422,-0.03456,-0.05442,-0.07361,-0.09194
235 DATA -0.10923,-0.12533,-0.14007,-0.15333,-0.16497
240 DATA -0.17490,-0.18302,-0.18927,-0.19360,-0.19597
245 DATA -0.19638,-0.19483,-0.19134,-0.18597,-0.17878
250 DATA -0.16985,-0.15929,-0.14719,-0.13370,-0.11896,-0.10311
260 DATA 0.00000,0.00125,0.00498,0.01117,0.01973
265 DATA 0.03060,0.04366,0.05879,0.07582,0.09459
270 DATA 0.11490,0.13656,0.15935,0.18303,0.20736
275 DATA 0.23029,0.25697,0.28174,0.30614,0.32993
280 DATA 0.35283,0.37462,0.39506,0.41391,0.43098
285 DATA 0.44606,0.45897,0.46956,0.47769,0.48323
290 DATA 0.48609,0.48621,0.48533,0.47803,0.46972
295 DATA 0.45863,0.44481,0.42833,0.40930,0.38785
300 DATA 0.36413,0.33829,0.31053,0.28106,0.25009
```

โปรแกรมที่ 3 (ต่อ)

```

300 DATA 0.36413,0.33829,0.31053,0.28106,0.25009
305 DATA 0.21785,0.18459,0.15057,0.11605,0.08129
310 DATA 0.04657,0.01214,-0.02172,-0.05475,-0.08670
315 DATA -0.11732,-0.14638,-0.17366,-0.19895,-0.22208
320 DATA -0.24287,-0.26118,-0.27688,-0.28987,-0.30007
325 DATA -0.30743,-0.31192,-0.31353,-0.31228,-0.30822
330 DATA -0.30142,-0.29197,-0.27998,-0.26559,-0.24897
335 DATA -0.23027,-0.20970,-0.18746,-0.16378,-0.13887
340 DATA -0.11299,-0.08638,-0.05928,-0.03197,-0.00468
345 DATA 0.02232,0.04881,0.07453,0.09925,0.12276
350 DATA 0.14485,0.16532,0.18401,0.20075,0.21542
355 DATA 0.22788,0.23805,0.24584,0.25122,0.25415
360 DATA 0.25463,0.25267,0.24832,0.24164,0.23270
365 DATA 0.22163,0.20854,0.19356,0.17687,0.15864
370 DATA 0.13905,0.11829,0.09658,0.07415,0.05119
375 DATA 0.02794,0.00462,-0.01855,-0.04134,-0.06353
380 DATA -0.08493,-0.10533,-0.12454,-0.14238,-0.15871
385 DATA -0.17336,-0.18622,-0.19716,-0.20611,-0.21299
390 DATA -0.21774,-0.22035,-0.22079,-0.21908,-0.21525
395 DATA -0.20935,-0.20146,-0.19167,-0.18008,-0.16681
400 DATA -0.15202,-0.13585,-0.11847,-0.10005,-0.08079
405 DATA -0.06086,-0.04048,-0.01985,-0.00084,-0.02138
410 DATA 0.04157,0.06123,0.08015,0.09817,0.11511
415 DATA 0.13081,0.14513,0.15793,0.16911,0.17856
420 DATA 0.18620,0.19197,0.19581,0.19772,0.19767
425 DATA 0.19568,0.19197,0.18603,0.17848,0.16923
430 DATA 0.15836,0.14601,0.13229,0.11735,0.10134,0.08443
500 INPUT X,FI
510 LPRINT "X",X,"FI",FI
520 GOSUB 2000
525 LPRINT "GM VALUE=",GM
530 Y=2*FI
540 FOR H=0 TO 100
550 L=H/100
555 U=G/10
560 FOR N=1 TO 2
565 L=H/700
570 T=X*L
580 GOSUB 1000
590 AY(N)=R
600 NEXT N
610 U1=AY(1)+GM*AY(2)*COS(Y)
620 U2=GM*AY(2)*SIN(Y)
630 LPRINT "L",L,"EX",U1,"EY",U2
635 PRINT Q,GM,N,G,H
640 NEXT H
650 END
1000 REM LINEAR INTERPOLATION SUBROUTINE
1010 K=INT(T*10)
1020 P=T*10-K
1030 F=K+1

```

โปรแกรมที่ 3 (ต่อ)

```

1030 F=K+1
1040 R=(1-P)*J(N,K)+P*J(N,F)
1050 RETURN
2000 REM COMPLEX-TO-PHASOR CONVERSION SUBROUTINE
2010 U1=SQR(ZR*ZR+ZI*ZI)
2020 U2=SQR(XR*XR+XI*XI)
2030 IF ZR=0 THEN ZR=(.1)^30
2040 IF ZI=0 THEN ZI=(.1)^30
2050 IF XR=0 THEN XR=(.1)^30
2060 IF XI=0 THEN XI=(.1)^30
2070 W1=ZI/ZR
2080 W2=XI/XR
2090 V1=ATN(W1)
2100 V2=ATN(W2)
2110 IF ZR<0 THEN V1=V1+3.141592653000001#
2120 IF ZI<0 THEN V1=V1+6.283185307#
2130 IF XR<0 THEN V2=V2+3.141592653000001#
2140 IF XI<0 THEN V2=V2+6.283185307#
2150 V1=180*V1/3.141592653500001#
2160 V2=180*V2/3.141592653500001#
2170 RETURN
3000 REM SUBROUTINE FOR FIND GM
3010 N=1
3020 T=X
3030 GOSUB 1000
3040 JOX=R
3050 N=2
3060 T=X
3070 GOSUB 1000
3080 GM=JOX/R
3090 RETURN

```

โปรแกรมที่ 4

```

10 REM THIS IS A PROGRAM FOR FINDING THE RADIATION PATTERN
15 PFM OF CORRUGATED HORN ANTENNA.
20 DIM J(2,176),IR(2),II(2),AR(701,2),AI(701,2),A(176),B(176)
30 FOR M=1 TO 2
40 FOR N=0 TO 175
50 READ J(M,N)
60 NEXT N
70 NEXT M
80 DATA 1.00000,0.99750,0.99002,0.97763,0.96040
85 DATA 0.93847,0.91200,0.88120,0.84629,0.80752
90 DATA 0.76520,0.71962,0.67113,0.62009,0.56686
95 DATA 0.51183,0.44540,0.39798,0.33999,0.28182
100 DATA 0.22389,0.16661,0.11036,0.05554,0.00251
105 DATA -0.04838,-0.09680,-0.14245,-0.18504,-0.22431
110 DATA -0.26005,-0.29206,-0.32019,-0.34430,-0.36430
115 DATA -0.38013,-0.39177,-0.39923,-0.40256,-0.40183
120 DATA -0.39715,-0.38867,-0.37656,-0.36101,-0.34226
125 DATA -0.32054,-0.29614,-0.26933,-0.24043,-0.20974
130 DATA -0.17760,-0.14433,-0.11029,-0.07580,-0.04121
135 DATA -0.00684,0.02697,0.05992,0.09170,0.12203
140 DATA 0.15065,0.17729,0.20174,0.22381,0.24331
145 DATA 0.26009,0.27404,0.28506,0.29310,0.29810
150 DATA 0.30008,0.29905,0.29507,0.28822,0.27860
155 DATA 0.26634,0.25160,0.23456,0.21541,0.19436
160 DATA 0.17165,0.14752,0.12222,0.09601,0.06916
165 DATA 0.04194,0.01462,-0.01252,-0.03923,-0.26525
170 DATA -0.09033,-0.11424,-0.13675,-0.15766,-0.17677
175 DATA -0.19393,-0.20898,-0.22180,-0.23228,-0.24034
180 DATA -0.24594,-0.24903,-0.24962,-0.24772,-0.24337
185 DATA -0.23665,-0.22764,-0.21664,-0.20320,-0.18806
190 DATA -0.17119,-0.15277,-0.13299,-0.11207,-0.09021
195 DATA -0.06765,-0.04462,-0.02133,0.00197,0.02505
200 DATA 0.04769,0.06967,0.09077,0.11080,0.12956
205 DATA 0.14688,0.16261,0.17659,0.18870,0.19884
210 DATA 0.20693,0.21289,0.21669,0.21830,0.21773
215 DATA 0.21499,0.21013,0.20322,0.19434,0.18385
220 DATA 0.17107,0.15695,0.14137,0.12449,0.10648
225 DATA 0.08754,0.06786,0.04764,0.02708,0.00639
230 DATA -0.01422,-0.03456,-0.05442,-0.07361,-0.09194
235 DATA -0.10923,-0.12533,-0.14007,-0.15333,-0.16497
240 DATA -0.17490,-0.18302,-0.18927,-0.19360,-0.19597
245 DATA -0.19638,-0.19483,-0.19134,-0.18597,-0.17878
250 DATA -0.16985,-0.15929,-0.14719,-0.13370,-0.11896,-0.10311
260 DATA 0.00000,0.00125,0.00498,0.01117,0.01973
265 DATA 0.03060,0.04366,0.05879,0.07582,0.09459
270 DATA 0.11490,0.13656,0.15935,0.18303,0.20736
275 DATA 0.23029,0.25697,0.28174,0.30614,0.32993
280 DATA 0.35283,0.37462,0.39506,0.41391,0.43098
285 DATA 0.44606,0.45897,0.46956,0.47769,0.48323
290 DATA 0.48609,0.48621,0.48533,0.47803,0.46972
295 DATA 0.45863,0.44481,0.42833,0.40930,0.38785
300 DATA 0.36413,0.33829,0.31053,0.28106,0.25009
305 DATA 0.21785,0.18459,0.15057,0.11605,0.08129

```


โปรแกรมที่ 4 (ต่อ)

```

305 DATA 0.21785,0.18459,0.15057,0.11605,0.08129
310 DATA 0.04657,0.01214,-0.02172,-0.05475,-0.08670
315 DATA -0.11732,-0.14638,-0.17366,-0.19895,-0.22208
320 DATA -0.24287,-0.26118,-0.27688,-0.28987,-0.30007
325 DATA -0.30743,-0.31192,-0.31353,-0.31228,-0.30822
330 DATA -0.30142,-0.29197,-0.27998,-0.26559,-0.24897
335 DATA -0.23027,-0.20970,-0.18746,-0.16378,-0.13887
340 DATA -0.11299,-0.08638,-0.05928,-0.03197,-0.00468
345 DATA 0.02232,0.04881,0.07453,0.09925,0.12276
350 DATA 0.14485,0.16532,0.18401,0.20075,0.21542
355 DATA 0.22788,0.23805,0.24584,0.25122,0.25415
360 DATA 0.25463,0.25267,0.24832,0.24164,0.23270
365 DATA 0.22163,0.20854,0.19356,0.17687,0.15864
370 DATA 0.13905,0.11829,0.09658,0.07415,0.05119
375 DATA 0.02794,0.00462,-0.01855,-0.04134,-0.06353
380 DATA -0.08493,-0.10533,-0.12454,-0.14238,-0.15871
385 DATA -0.17336,-0.18622,-0.19716,-0.20611,-0.21299
390 DATA -0.21774,-0.22035,-0.22079,-0.21908,-0.21525
395 DATA -0.20935,-0.20146,-0.19167,-0.18008,-0.16681
400 DATA -0.15202,-0.13585,-0.11847,-0.10005,-0.08079
405 DATA -0.06086,-0.04048,-0.01985,-0.00084,-0.02138
410 DATA 0.04157,0.06123,0.08015,0.09817,0.11511
415 DATA 0.13081,0.14513,0.15793,0.16911,0.17856
420 DATA 0.18620,0.19197,0.19581,0.19772,0.19767
425 DATA 0.19568,0.19197,0.18603,0.17848,0.16923
430 DATA 0.15836,0.14601,0.13229,0.11735,0.10134,0.08443
500 REM NUMERICAL INTEGRATION BY TRAPEZOIDAL METHOD
510 INPUT X,Z,FI
520 LPRINT "X=",X,"Z=",Z,"FI=",FI
525 LPRINT "U","EPX","PH-X","EPY","PH-Y"
530 W=6.283185307200002##Z
540 GOSUB 3000
550 FOR G=0 TO 175 STEP 2
555 U=G/10
560 FOR H=0 TO 700
565 L=H/700
570 Y=W*L*L
580 CS1=COS(Y)
590 SN1=SIN(Y)
600 FOR N=1 TO 2
610 T=X*L
620 GOSUB 1000
630 Q=R
635 PRINT Q,GM,N,G,H
640 T=U*L
650 GOSUB 1000
660 Q=Q*R*L
670 AR(H,N)=Q*CS1
680 AI(H,N)=Q*SN1
690 IR(N)=IR(N)+AR(H,N)
700 II(N)=II(N)+AI(H,N)

```

โปรแกรมที่ 4 (ต่อ)



```

700 II(N)=II(N)+AI(H,N)
710 NEXT N
720 NEXT H
722 AR(701,1)=(AR(701,1)+AR(0,1))/2
724 AR(701,2)=(AR(701,2)+AR(0,2))/2
726 AI(701,1)=(AI(701,1)+AI(0,1))/2
728 AI(701,2)=(AI(701,2)+AI(0,2))/2
730 IR(1)=(IR(1)-AR(701,1))*0.0014285714#
735 IR(2)=(IR(2)-AR(701,2))*0.0014285714#
740 II(1)=(II(1)-AI(701,1))*0.0014285714#
745 II(2)=(II(2)-AI(701,2))*0.0014285714#
750 D=2*FI
760 CS2=COS(D)
770 SN2=SIN(D)
780 YR=-GM*IR(2)*CS2
790 YI=-GM*II(2)*CS2
800 ZR=IR(1)+YR
810 ZI=II(1)+YI
820 XR=-GM*IR(2)*SN2
830 XI=-GM*II(2)*SN2
840 GOSUB 2000
850 LPRINT U,U1,V1,U2,V2
852 A(G)=U1
854 B(G)=U2
860 NEXT G
870 GOSUB 4000
880 END
1000 REM LINEAR INTERPOLATION SUBROUTINE
1010 K=INT(T*10)
1020 P=T*10-K
1030 F=K+1
1040 R=(1-P)*J(N,K)+P*J(N,F)
1050 RETURN
2000 REM COMPLEX-TO-PHASOR CONVERSION SUBROUTINE
2010 U1=SQR(ZR*ZR+ZI*ZI)
2020 U2=SQR(XR*XR+XI*XI)
2030 IF ZR=0 THEN ZR=(.1)^30
2040 IF ZI=0 THEN ZI=(.1)^30
2050 IF XR=0 THEN XR=(.1)^30
2060 IF XI=0 THEN XI=(.1)^30
2070 W1=ZI/ZR
2080 W2=XI/XR
2090 V1=ATN(W1)
2100 V2=ATN(W2)
2110 IF ZR<0 THEN V1=V1+3.141592653000001#
2120 IF ZI<0 THEN V1=V1+6.283185307#
2130 IF XR<0 THEN V2=V2+3.141592653000001#
2140 IF XI<0 THEN V2=V2+6.283185307#
2150 V1=180*V1/3.141592653500001#
2160 V2=180*V2/3.141592653500001#
2170 RETURN
3000 REM SUBROUTINE FOR FIND GM

```

โปรแกรมที่ 4 (ต่อ)

```
3000 REM SUBROUTINE FOR FIND GM
3010 N=1
3020 T=X
3030 GOSUB 1000
3040 JOX=R
3050 N=2
3060 T=X
3070 GOSUB 1000
3080 GM=JOX/R
3090 RETURN
4000 REM NORMALISED VALUES SOLUTION SUBROUTINE
4010 MX1=0
4020 MX2=0
4030 FOR C=0 TO 170 STEP 2
4040 IF MX1<A(C) THEN MX1=A(C)
4050 IF MX2<B(C) THEN MX2=B(C)
4060 NEXT C
4070 LPRINT "MX1=",MX1,"MX2=",MX2
4080 FOR E=0 TO 170 STEP 2
4082 IF A(E)=0 THEN ZA=A(E) ELSE 4090
4084 IF B(E)=0 THEN ZB=B(E) ELSE 4100
4090 A(E)=A(E)/MX1
4100 B(E)=B(E)/MX2
4110 AA=20*LOG(A(E))
4120 BB=20*LOG(B(E))
4130 LPRINT "DBX",AA,"DBY",BB
4140 NEXT E
4150 RETURN
```

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ประวัติผู้เขียน

นายภิรมย์ ภู่พฤษา เกิดที่กรุงเทพฯ เมื่อวันที่ 2 กุมภาพันธ์ พ.ศ.2497
ได้รับปริญญาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า จากสถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า
วิทยาเขตลาดกระบัง ปี พ.ศ.2520 ปัจจุบันทำงานอยู่ที่ กรมไปรษณีย์โทรเลข ตำแหน่ง
นักวิชาการสื่อสาร 4 ฝ่ายวิจัยพัฒนาการสื่อสาร



ศูนย์วิทยทรัพยากร
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย