



2

Saluran Transmisi

Tujuan Pembelajaran Umum:

Mengenalkan fungsi dan jenis-jenis saluran transmisi, memahami penjalaran gelombang di dalam saluran transmisi.

Tujuan Pembelajaran Khusus:

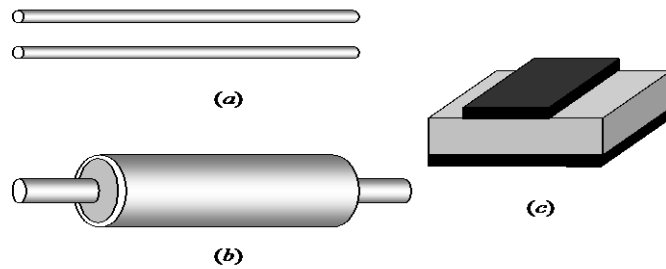
Menjelaskan model rangkaian dari saluran transmisi, menjelaskan persamaan gelombang untuk saluran takmeredam dan saluran meredam, menjelaskan karakteristik saluran dengan terminasi: impedansi, koefisien pantul, dan VSWR.

2.1 Pendahuluan

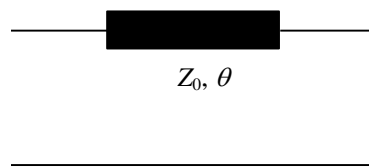
Penjalaran gelombang elektromagnetik dapat dibagi menjadi penjalaran terbimbing dan penjalaran tak terbimbing. Gelombang yang penjalarannya terbimbing disebut gelombang terbimbing (*guided wave*), dan yang penjalarannya takterbimbing disebut gelombang tak-terbimbing (*unguided wave*) atau biasa disebut gelombang radio. Alat yang dapat membimbing gelombang disebut pembimbing gelombang (*waveguide*). Contoh pembimbing gelombang adalah: kabel 2-kawat, kabel sesumbu (*coaxial*), bumbung gelombang (*waveguide*), saluran strip (*stripline*), saluran mikrostrip (*microstripline*), dan kabel serat optik; hanya saja pada kabel serat optik (*optical fiber*) gelombang yang dibimbing adalah gelombang cahaya tampak. Pada gelombang tak terbimbing gelombang menjalar melalui radiasi (makanya disebut gelombang radio), dan divais yang dapat mengubah gelombang terbimbing menjadi gelombang tak terbimbing (atau sebaliknya) disebut antena.

Saluran transmisi asalnya adalah penamaan untuk kebel 2-kawat dan kabel sesumbu, karena kedua kabel ini dapat menyalurkan energi gelombang dari satu titik ke titik lain yang jauh. Tapi dengan berkembangnya teknologi bahan, maka sekarang banyak rangkaian gelombang mikro yang dibentuk dari saluran strip atau saluran mikrostrip. Jadi sebenarnya saluran strip maupun saluran mikrostrip termasuk saluran transmisi.

Pada saluran transmisi, arus dan tegangan yang timbul adalah arus dan tegangan sebenarnya, sehingga pendekatan teori rangkaian dapat digunakan. Berbeda dengan saluran transmisi, pada bumbung gelombang dan serat optik, arus dan tegangan yang timbul bukan arus dan tegangan sebenarnya, sehingga dalam pembahasannya tidak dapat digunakan teori rangkaian, tapi harus digunakan teori medan elektromagnetik dengan menurunkan medan-medan listrik dan magnetik dari persamaan Maxwell. Walaupun demikian pada sebuah divais gelombang mikro sering dilakukan analisis jaringan (*network analysis*) untuk memperoleh parameter-parameter divais, dan dalam analisis jaringan biasanya digunakan besaran-besaran arus dan tegangan, walaupun arus dan tegangan ekuivalen. Gambar 2.1 memperlihatkan bentuk fisik dari beberapa jenis saluran transmisi, dan simbol pada rangkaian elektronik diperlihatkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Bentuk fisik beberapa saluran transmisi (a) saluran dua kawat paralel; (b) kabel sesumbu (*coaxial*); (c) saluran mikrostrip (*microstrip line*)

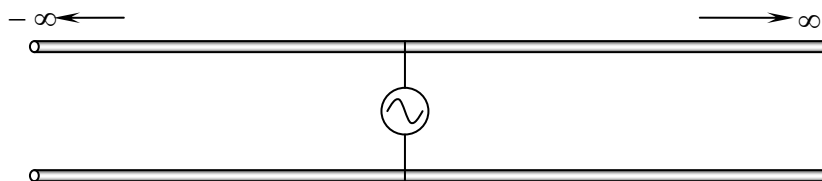


Gambar 2.2 Simbol saluran transmisi pada rangkaian elektronik

2.2 Model Rangkaian Listrik Dari Saluran Transmisi

Sebuah saluran transmisi dengan panjang takberhingga diperlihatkan pada Gambar 2.3, dengan sumber tegangan diletakkan pada suatu tempat, $z = 0$. Pada kasus ini gelombang arus dan tegangan akan menjalar ke arah $\pm z$ dan tidak kembali lagi.

Untuk saluran sepanjang dz yang sangat pendek, lihat Gambar 2.4a, dapat dimodelkan dengan rangkaian listrik ekivalen Rdz , Ldz , Gdz , dan Cdz , seperti pada Gambar 2.4b. Pada gambar tersebut:



Gambar 2.3 Sebuah saluran transmisi dengan panjang takberhingga

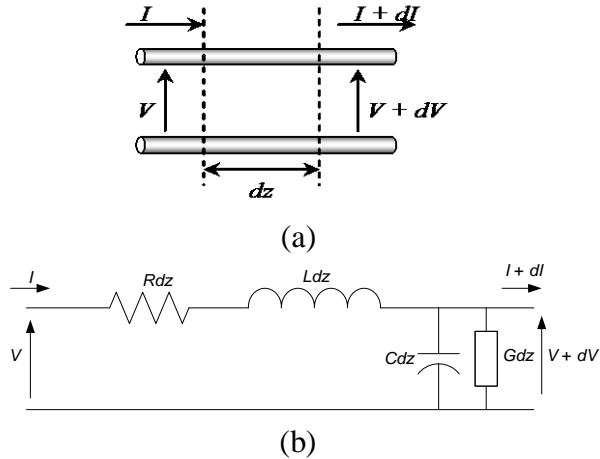
R adalah resistansi/satuan panjang (Ω/m) yang menunjukkan rugi-rugi berupa panas yang timbul pada kedua konduktor.

G , konduktansi/satuan panjang (S/m), menunjukkan rugi-rugi pada dielektrik yang memisahkan kedua konduktor.

L , induktansi/satuan panjang (H/m), menunjukkan penyimpanan energi dalam bentuk energi magnetik.

C , kapasitansi/satuan panjang (F/m), menunjukkan penyimpanan energi dalam bentuk energi listrik.

Gelombang elektromagnetik dalam saluran menjalar karena adanya perubahan energi listrik menjadi energi magnetik dan sebaliknya; dengan adanya L dan C , terjadi penjalaran gelombang dengan terjadinya perubahan fasa gelombang, dan R dan G meredam gelombang sepanjang saluran tersebut.



Gambar 2.4 (a) elemen saluran sepanjang dz ; (b) Rangkaian ekivalen saluran sepanjang dz

Untuk memperoleh persamaan tegangan dan arus, gunakan hukum Khirchoff tentang tegangan pada Gambar 2.4b; dengan asumsi sinyal sinusoidal, akan diperoleh

$$\frac{dV}{dz} = -(R + j\omega L)I = -ZI \quad (2.1)$$

dengan

$$Z = R + j\omega L \quad (2.2)$$

adalah impedansi/satuan panjang (Ω/m). Dengan cara yang sama, jika digunakan hukum Khirchoff untuk arus,

$$\frac{dI}{dz} = -(G + j\omega C)V = -YV \quad (2.3)$$

dengan

$$Y = G + j\omega C \quad (2.4)$$

adalah admitansi/satuan panjang (mho/m).

2.2.1 Penjalaran Gelombang dalam Saluran

Untuk memperoleh persamaan gelombang, turunkan (2.1) terhadap z sehingga diperoleh

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = -Z \frac{dI}{dz}$$

dengan menggunakan (2.3), maka diperoleh persamaan gelombang untuk tegangan

$$\frac{d^2 V}{dz^2} = ZYV \quad (2.5)$$

dan dengan cara yang sama, lakukan pada (2.3)

$$\frac{d^2 I}{dz^2} = ZYI \quad (2.6)$$

Persamaan (2.5) dan (2.6) adalah persamaan gelombang dengan solusi umum

$$V = V_0^+ e^{-\gamma z} + V_0^- e^{\gamma z} \quad (2.7a)$$

$$I = I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z} \quad (2.7b)$$

berupa gelombang berjalan. Notasi V_0^+ , V_0^- menunjukkan amplituda-amplituda tegangan yang menjalar ke arah $+z$ dan $-z$. Begitu juga untuk arus; yang menjalar ke arah $+z$ dan $-z$ dinyatakan dengan I_0^+ dan I_0^- . Gelombang ini menjalar dengan konstanta propagasi γ , dengan

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2.8)$$

dan α adalah konstanta redaman (Np/m), $\beta = 2\pi/\lambda$ adalah konstanta fasa, dan λ panjang gelombang dalam medium dielektrik yang mengisi ruang di antara kedua konduktor. Jika (2.7) diturunkan dua kali terhadap z , maka akan diperoleh

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)} \quad (2.9)$$

Sekarang turunkan (2.7a) terhadap z untuk mendapatkan

$$\frac{dV}{dz} = -\gamma (V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}) \quad (2.10)$$

kemudian bandingkan (2.10) dengan (2.1), maka kita akan memperoleh

$$-\gamma (V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z}) = -Z (I_0^+ e^{-\gamma z} + I_0^- e^{\gamma z})$$

atau

$$V_0^+ e^{-\gamma z} - V_0^- e^{\gamma z} = \frac{Z}{\gamma} I_0^+ e^{-\gamma z} + \frac{Z}{\gamma} I_0^- e^{\gamma z}$$

Besaran Z/γ pada persamaan di atas mempunyai satuan ohm (Ω). Besaran tersebut disebut **impedansi karakteristik**. Jadi impedansi karakteristik saluran adalah

$$Z_0 = \frac{Z}{\gamma} = \sqrt{\frac{Z}{Y}} = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}} \quad (2.11)$$

Juga diperoleh hubungan $I_0^+ = V_0^+/Z_0$, dan $I_0^- = -V_0^-/Z_0$.

2.2.2 Saluran Tak Meredam

Saluran tak meredam jika $\alpha = 0$, atau $R = G = 0$. Dengan demikian, maka

$$\gamma = j\beta = j\omega\sqrt{LC} \quad (2.12)$$

Kecepatan fasa gelombang

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} = \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.13)$$

dan impedansi karakteristik

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.14)$$

bersifat resistif. Solusi gelombang (2.7) menjadi

$$\begin{aligned} V &= V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} \\ I &= \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} \end{aligned} \quad (2.15)$$

2.2.3 Saluran Dengan Redaman Kecil

Untuk saluran yang meredam dengan redaman kecil, berlaku $R \ll \omega L$ dan $G \ll \omega C$ sehingga (2.11) dapat didekati menjadi

$$Z_0 \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad (2.16)$$

dan konstanta propagasi menjadi

$$\gamma = \alpha + j\beta = \sqrt{(R + j\omega L)(G + j\omega C)}$$

Konstanta redaman dan konstanta fasa dapat ditentukan dengan cara berikut:

$$\gamma^2 = (\alpha + j\beta)^2 = (R + j\omega L)(G + j\omega C)$$

atau

$$\alpha^2 - \beta^2 + j2\alpha\beta = RG - \omega^2 LC + j\omega(RC + GL)$$

karena redaman saluran kecil, maka $\alpha \ll \beta$ dan karenanya $RG \ll \omega^2 LC$. Dengan demikian

$$\beta \approx \omega\sqrt{LC} \quad (2.17)$$

dan

$$2\alpha\beta = \omega(RC + GL)$$

dengan β pada (2.17), maka diperoleh

$$\alpha \approx \frac{R}{2} \sqrt{\frac{C}{L}} + \frac{G}{2} \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{R}{2Z_0} + \frac{GZ_0}{2} \quad (2.18)$$

dan kecepatan fasa gelombang

$$v_p = \frac{\omega}{\beta} \approx \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (2.19)$$

dan sama dengan kecepatan cahaya di vakum jika dielektriknya berupa udara.

2.2.4 Saluran Tak Mendistorsi

Pada saluran yang meredam, konstanta propagasi diberikan oleh (2.9) dengan konstanta fasa merupakan fungsi kompleks dari frekuensi ω , bukan fungsi linier seperti pada (2.17), karena (2.17) hanya berupa pendekatan untuk redaman yang sangat kecil. Akibat konstanta fasa fungsi kompleks dari frekuensi, maka kecepatan fasa untuk tiap komponen frekuensi akan berbeda. Akibatnya delay sinyal untuk frekuensi yang berbeda akan berbeda juga. Akibat akhirnya adalah tiap komponen frekuensi akan sampai di tujuan pada waktu yang berbeda-beda. Dengan demikian sinyal dengan *bandwidth* yang lebar akan mengalami “dispersi”, yaitu mengalami distorsi. Untuk saluran yang pendek efek ini tidak terasa. Tetapi akan terasa jika saluran sangat panjang. Efek ini akan dibahas lagi ketika kita membicarakan kecepatan grup dalam bumbung gelombang pada akhir bab tiga nanti.

Sebuah saluran dikatakan tidak mendistorsi sinyal jika

$$\frac{R}{L} = \frac{G}{C} \quad (2.20)$$

karena pada kasus ini

$$\gamma = j\omega\sqrt{LC}\sqrt{1 - j2\frac{R}{\omega L} - \left(\frac{R}{\omega L}\right)^2} = j\omega\sqrt{LC}\left(1 - j\frac{R}{\omega L}\right)$$

atau

$$\gamma = \alpha + j\beta = R\sqrt{\frac{C}{L}} + j\omega\sqrt{LC} \quad (2.21)$$

yang memperlihatkan konstanta fasa fungsi linier dari frekuensi ω . Persamaan (2.21) juga memperlihatkan konstanta redaman yang tidak bergantung pada frekuensi.

2.2.5 Parameter Utama Saluran Transmisi

Parameter utama saluran transmisi adalah R , G , L , dan C . Parameter lain diturunkan berdasarkan parameter utama tersebut. Jika keempat parameter ini diketahui, maka parameter lain seperti impedansi karakteristik, konstanta propagasi, konstanta redaman, konstanta fasa, dan kecepatan fasa dapat diketahui. Induktansi menunjukkan penyimpanan energi dalam bentuk medan magnetik. Energi yang disimpan dalam bentuk energi magnetik/satuan panjang dituliskan sebagai

$$W_m = \frac{\mu}{4} \int_S |\mathbf{H}|^2 ds \quad (2.22)$$

dengan ds adalah elemen luas; dari teori rangkaian diketahui $W_m = L |I_0|^2/4$. Dengan demikian induktansi diri persatuan panjang adalah

$$L = \frac{\mu}{|I_0|^2} \int_S |\mathbf{H}|^2 ds \quad (\text{H/m}) \quad (2.23)$$

Dengan cara yang sama, energi yang tersimpan dalam bentuk energi listrik/satuan panjang adalah

$$W_e = \frac{\varepsilon}{4} \int_S |\mathbf{E}|^2 ds \quad (2.24)$$

dan, menurut teori rangkaian, $W_e = C |V_0|^2/4$ sehingga kapasitansi per satuan panjang

$$C = \frac{\varepsilon}{|V_0|^2} \int_S |\mathbf{E}|^2 ds \quad (\text{F/m}) \quad (2.25)$$

Disipasi pada konduktor disebabkan oleh penyerapan arus oleh resistansi konduktor. Daya disipasi per satuan panjang yang disebabkan oleh keterbatasan konduktivitas konduktor adalah

$$P_c = \frac{R_s}{2} \int_l |\mathbf{H}|^2 dl \quad (2.26)$$

sedangkan dari teori rangkaian, $P_c = R|I_0|^2/2$, sehingga resistansi per satuan panjang adalah

$$R = \frac{R_s}{|I_0|^2} \int_C |\mathbf{H}|^2 dl \quad (\Omega/\text{m}) \quad (2.27)$$

Pada (2.27) $R_s = 1/\sigma\delta_s$ adalah resistansi permukaan dari konduktor, dan C adalah kontur jalan yang digunakan untuk mengintegrasikan; σ adalah konduktivitas konduktor, dan δ_s adalah kedalaman kulit (*skin depth*). Daya disipasi yang hilang dalam dielektrik adalah

$$P_d = \frac{\omega\epsilon''}{2} \int_S |\mathbf{E}|^2 ds \quad (2.28)$$

dengan ϵ'' adalah bagian imajiner dari permitivitas kompleks $\epsilon = \epsilon' - j\epsilon'' = \epsilon'(1 - j \tan \delta)$; $\tan \delta$ adalah tangen rugi-rugi (*loss tangent*). Dalam teori rangkaian $P_d = G|V_0|^2/2$ sehingga konduktansi paralel per satuan panjang adalah

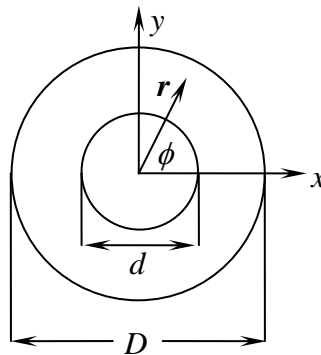
$$G = \frac{\omega\epsilon''}{|V_0|^2} \int_S |\mathbf{E}|^2 ds \quad (\text{S/m}) \quad (2.29)$$

Contoh 2.1 Parameter utama kabel sesumbu

Medan listrik dan medan magnetik di dalam saluran kebel sesumbu yang diperlihatkan pada Gambar 2.5 adalah

$$\mathbf{E} = \frac{V_0}{r \ln(D/d)} e^{-\gamma z} \mathbf{a}_r$$

$$\mathbf{H} = \frac{I_0}{2\pi r} e^{-\gamma z} \mathbf{a}_\phi$$



Gambar 2.5 Kabel sesumbu untuk contoh 2.1

Solusi:

Dari kedua medan tersebut kita dapat mencari parameter utama saluran dengan menggunakan (2.23), (2.25), (2.27), dan (2.29). Diperoleh

$$L = \frac{\mu}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \int_{d/2}^{D/2} \frac{1}{r^2} r dr d\phi = \frac{\mu}{2\pi} \ln \frac{D}{d} \quad (2.30)$$

$$C = \frac{\varepsilon'}{(\ln(D/d))^2} \int_0^{2\pi} \int_{d/2}^{D/2} \frac{1}{r^2} r dr d\phi = \frac{2\pi\varepsilon'}{\ln(D/d)} \quad (2.31)$$

$$R = \frac{R_s}{(2\pi)^2} \int_0^{2\pi} \left(\frac{2}{d} + \frac{2}{D} \right) d\phi = \frac{R_s}{\pi} \left(\frac{1}{d} + \frac{1}{D} \right) \quad (2.32)$$

$$G = \frac{\omega\varepsilon''}{(\ln(D/d))^2} \int_0^{2\pi} \int_{d/2}^{D/2} \frac{1}{r^2} r dr d\phi = \frac{2\pi\omega\varepsilon''}{\ln(D/d)} \quad (2.33)$$

Dari keempat parameter utama tersebut akan diperoleh parameter lain untuk kabel sesumbu, yaitu: impedansi karakteristik

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L}{C}} = \frac{\eta_0}{2\pi\sqrt{\varepsilon_r}} \ln \frac{D}{d} \quad (2.34)$$

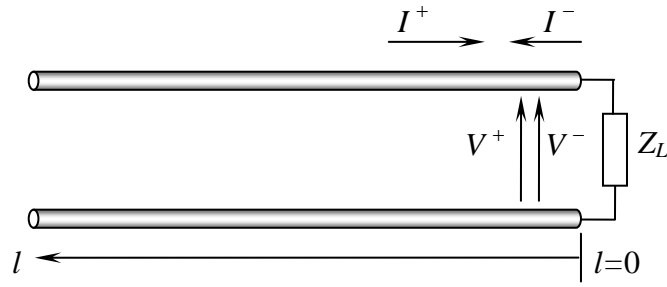
dengan $\eta_0 = \sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} = 120\pi \Omega$, atau 377Ω adalah impedansi intrinsik vakum (udara). Konstanta fasa

$$\beta = \omega\sqrt{LC} = \omega\sqrt{\mu\varepsilon'} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r} \quad (2.35)$$

dengan $c = 3 \times 10^8$ adalah kecepatan cahaya di vakum. Konstanta redaman dan kecepatan fasa dapat dicari berdasarkan (2.18) dan (2.19).

2.3 Saluran Transmisi Dengan Terminasi

Gambar 2.6 memperlihatkan sebuah saluran transmisi dengan terminasi beban Z_L pada ujung kanannya. Arus dan tegangan (tentu juga daya) yang datang ke beban sebagian akan diserap dan sebagian lagi akan dipantulkan. Perbandingan gelombang pantul (arus atau tegangan) terhadap gelombang datang disebut koefisien pantul, dan perbandingan gelombang yang diserap terhadap gelombang datang disebut koefisien transmisi.



Gambar 2.6 Saluran dengan terminasi beban Z_L

2.3.1 Saluran Tak Meredam

Persamaan arus dan tegangan (2.15) dapat kita pandang sebagai gelombang yang datang menuju beban dan gelombang yang dipantulkan oleh beban. Gelombang datang adalah yang menjalar ke arah $+z$ dan gelombang pantul yang berarah ke $-z$, dan masing-masing dinyatakan dengan V^+ , V^- , I^+ , dan I^- , maka

$$\begin{aligned} V &= V_0^+ e^{-j\beta z} + V_0^- e^{j\beta z} = V^+ + V^- \\ I &= \frac{V_0^+}{Z_0} e^{-j\beta z} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{j\beta z} = I^+ - I^- \end{aligned} \quad (2.36)$$

Kemudian, karena beban ada pada ujung kanan, dan beban akan dijadikan acuan, maka akan lebih mudah jika variabel jarak z kita ganti dengan $-l$. Dengan demikian (2.36) menjadi

$$\begin{aligned} V &= V_0^+ e^{j\beta l} + V_0^- e^{-j\beta l} = V^+ + V^- \\ I &= \frac{V_0^+}{Z_0} e^{j\beta l} - \frac{V_0^-}{Z_0} e^{-j\beta l} = I^+ - I^- \end{aligned} \quad (2.37)$$

Koefisien Pantul

Untuk menentukan koefisien pantul, kita gunakan syarat batas pada ujung beban. Di beban, $l = 0$, tegangan adalah $V = V_L = V_0^+ + V_0^-$ dan $I = I_L = V_0^+/Z_0 - V_0^-/Z_0$. Dari kedua syarat batas tersebut kita dapatkan

$$\begin{aligned} V_0^+ &= \frac{V_L + Z_0 I_L}{2} \\ V_0^- &= \frac{V_L - Z_0 I_L}{2} \end{aligned} \quad (2.38)$$

kerena $V_L = Z_L I_L$, maka

$$\begin{aligned} V_0^+ &= \frac{Z_L + Z_0}{2} I_L \\ V_0^- &= \frac{Z_L - Z_0}{2} I_L \end{aligned} \quad (2.39)$$

Dengan demikian (2.37) akan menjadi

$$\begin{aligned} V &= \frac{Z_L + Z_0}{2} I_L e^{j\beta l} + \frac{Z_L - Z_0}{2} I_L e^{-j\beta l} \\ I &= \frac{Z_L + Z_0}{2Z_0} I_L e^{j\beta l} - \frac{Z_L - Z_0}{2Z_0} I_L e^{-j\beta l} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Koefisien pantul untuk tegangan pada jarak l dari beban

$$\Gamma_V = \frac{V^-}{V^+} = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-j2\beta l} \quad (2.41)$$

dan untuk arus

$$\Gamma_I = \frac{I^-}{I^+} = -\frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-j2\beta l} = -\Gamma_V \quad (2.42)$$

Dari (2.42) kita lihat bahwa besarnya nilai koefisien pantul untuk arus dan tegangan sama, $|\Gamma_V| = |\Gamma_I|$, hanya fasanya berbeda 180° . Oleh sebab itu untuk selanjutnya kita akan selalu menggunakan koefisien pantul untuk tegangan ketika kita membahas tentang koefisien pantul. Jadi

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-j2\beta l} \quad (2.43)$$

Koefisien pantul di beban, $l = 0$, kita nyatakan dengan

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = \rho_L e^{j\theta} \quad (2.44)$$

dengan ρ_L adalah besarnya koefisien pantul di beban dan θ sudut koefisien pantul tersebut. Dengan demikian (2.43) dapat kita nyatakan berdasarkan (2.44) menjadi

$$\Gamma = \rho_L e^{j(\theta - 2\beta l)} = \rho_L \angle \theta - 2\beta l \quad (2.45)$$

Koefisien transmisi di beban, didefinisikan sebagai

$$T = \frac{V_L}{V^+} = 1 + \frac{V_0^-}{V_0^+} = 1 + \Gamma_L \quad (2.46)$$

Dengan melihat (2.46) tampak koefisien transmisi, $T \geq 1$. Apakah ini berarti tegangan atau arus yang ditransmisikan lebih besar dari yang datang? Sebenarnya tidak demikian. Untuk membuktikan bahwa yang ditransmisikan tidak lebih besar dari yang datang harus dilihat dayanya.

$$P_L = \frac{1}{2} \text{Re}[V_L I_L^*] = \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} (1 - \rho_L^2) \leq \frac{|V_0^+|^2}{2Z_0} \quad (2.47)$$

yang selalu lebih kecil atau sama dengan daya datang.

Daya yang diserap beban akan maksimum jika $|\Gamma_L| = \rho_L = 0$ dan tidak ada daya yang diserap jika $\rho_L = 1$. Pada keadaan terjadi transfer daya maksimum ($\rho_L = 0$), keadaan ini disebut “sesuai” (*matched*) dan terjadi jika $Z_L = Z_0$. Masalah penyesuaian impedansi akan kita bahas lebih jauh pada bab 6.

Ketika beban tidak sesuai dengan saluran (*mismatched*), tidak semua daya yang tersedia diserap beban, tapi sebagian dipantulkan. “Rugi-rugi” (bukan rugi-rugi disipasi) karena pantulan disebut *return loss*, RL , yang menunjukkan kadar kesesuaian antara beban dengan saluran. Dalam dB, return loss didefinisikan sebagai

$$RL = -20 \log |\Gamma| \text{ dB} \quad (2.48)$$

Untuk transfer daya maksimum $RL = \infty$ dan untuk pantulan total $|\Gamma| = 1$, $RL = 0$ dB. Alat untuk mengukur return loss dan koefisien transmisi (*insertion loss*) adalah *network analyzer*.

Gelombang Berdiri Dan VSWR

Ketika beban tidak sesuai dengan saluran, gelombang pantul dan gelombang datang akan saling berinterferensi dan membentuk gelombang berdiri. Interferensi kedua gelombang ini dapat saling menguatkan atau saling melemahkan. Jika saling menguatkan akan dihasilkan tegangan (arus) maksimum, dan jika saling melemahkan akan dihasilkan tegangan (arus) minimum. Perbandingan nilai maksimum terhadap nilai minimum disebut *Standingwave ratio* (SWR). Jika yang digunakan adalah tegangan (dan ini yang akan selalu kita pakai), maka disebut *VSWR*.

Tegangan dan arus dinyatakan oleh (2.40). Persamaan untuk tegangan dapat dituliskan kembali dalam bentuk

$$V = \frac{Z_L + Z_0}{2} I_L e^{j\beta l} \left(1 + \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} e^{-j2\beta l} \right) = V^+ (1 + \rho_L e^{j(\theta - 2\beta l)}) \quad (2.49)$$

Nilai tegangan akan maksimum jika tegangan datang dan tegangan pantul sefasa. Posisi-posisi terjadinya tegangan maksimum diperoleh dari

$$\theta - 2\beta l_{\max} = -2n\pi \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

tanda minus pada ruas kanan persamaan di atas digunakan karena makin menjauhi beban, fasa tegangan makin negatif. Dari persamaan di atas diperoleh

$$l_{\max} = \frac{\theta + 2n\pi}{4\pi} \lambda \quad (2.50)$$

dengan memasukkan $\beta = 2\pi/\lambda$, dan λ adalah panjang gelombang dalam saluran. Tegangan maksimum adalah

$$V_{\max} = |V^+| + |V^-| = |V_0^+|(1 + \rho_L) \quad (2.51)$$

Nilai tegangan akan minimum jika gelombang datang dan gelombang pantul berbeda fasa kelipatan ganjil dari 180° . Posisi terjadinya tegangan minimum adalah

$$l_{\min} = \frac{\theta + (2n-1)\pi}{4\pi} \lambda \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (2.52)$$

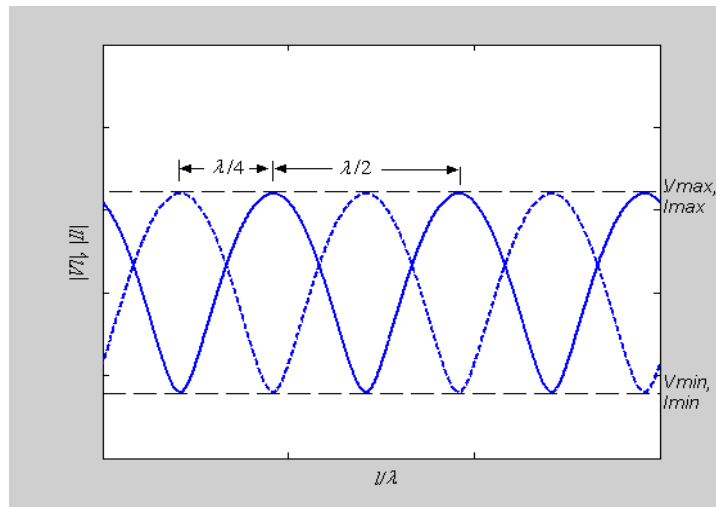
dengan tegangan minimum

$$V_{\min} = |V^+| - |V^-| = |V_0^+|(1 - \rho_L) \quad (2.53)$$

Dari (2.51) dan (2.53) kita mendapatkan VSWR, yaitu

$$VSWR = \frac{V_{\max}}{V_{\min}} = \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L} \quad (2.54)$$

Pola gelombang berdiri untuk saluran tak meredam secara umum diperlihatkan pada Gambar 2.7 di bawah ini.



Gambar 2.7 Pola gelombang berdiri pada saluran tak meredam

Contoh 2.2 Beban open dan short circuit

Untuk beban short circuit dan open circuit, tidak ada daya yang diserap; semua daya akan dipantulkan sehingga terjadi pantulan total. Pada kasus ini nilai koefisien pantul berharga satu, hanya saja fasanya yang berbeda 180° . Untuk beban open circuit, $Z_L = \infty$ sehingga

$$\Gamma_L = \lim_{Z_L \rightarrow \infty} \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = 1 \angle 0^\circ$$

$$VSWR = \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L} = \infty$$

$$V_{\max} = |V_0^+| (1 + \rho_L) = 2|V_0^+|$$

$$V_{\min} = |V_0^+| (1 - \rho_L) = 0$$

$$l_{\max 1} = \frac{\theta}{4\pi} \lambda = 0$$

$$l_{\min 1} = \frac{\theta + \pi}{4\pi} \lambda = \frac{\lambda}{4}$$

Untuk beban short circuit, $Z_L = 0$ sehingga

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0} = -1 = 1 \angle 180^\circ$$

$$VSWR = \frac{1 + \rho_L}{1 - \rho_L} = \infty$$

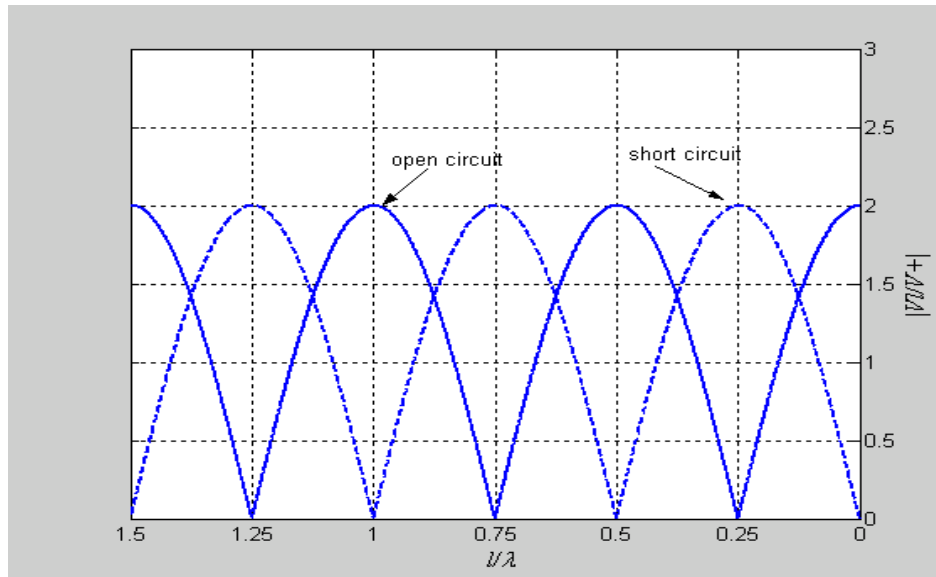
$$V_{\max} = |V_0^+| (1 + \rho_L) = 2|V_0^+|$$

$$V_{\min} = |V_0^+| (1 - \rho_L) = 0$$

$$l_{\max 1} = \frac{\theta}{4\pi} \lambda = \frac{\pi}{4\pi} \lambda = \frac{\lambda}{4}$$

$$l_{\min 1} = \frac{\theta + \pi}{4\pi} \lambda = \frac{\pi + \pi}{4\pi} \lambda = \frac{\lambda}{2} = 0$$

Pola gelombang berdiri untuk kedua beban tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.8 di bawah ini.



Gambar 2.8 Pola gelombang berdiri (tegangan) untuk beban short dan open circuit

Contoh 2.3 Pola gelombang berdiri dan VSWR untuk berbagai jenis beban

Sebuah saluran dengan impedansi karakteristik Z_0 , diterminasi dengan sebuah beban Z_L . Tentukanlah koefisien pantul di beban, VSWR, posisi-posisi terjadinya tegangan maksimum dan minimum, kemudian gambarkan pola gelombang berdirinya jika beban tersebut adalah: (a) Z_0 , (b) $3Z_0$, (c) $Z_0/3$, (d) jZ_0 , (e) $-jZ_0$, (f) $2Z_0 + jZ_0$, dan (g) $2Z_0 - jZ_0$.

Koefisien pantul di beban

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}$$

(a) $\Gamma_L = 0$; (b) $\Gamma_L = 1/2$; (c) $\Gamma_L = -1/2$; (d) $\Gamma_L = j1$; (e) $\Gamma_L = -j1$; (f) $\Gamma_L = 0,45 \angle 26,6^\circ$; (g) $\Gamma_L = 0,45 \angle -26,6^\circ$.

VSWR dan tegangan maksimum/minimum

Gunakan (2.54) akan diperoleh

(a) $VSWR = 1$; (b) $VSWR = 3$; (c) $VSWR = 3$; (d) $VSWR = \infty$; (e) $VSWR = \infty$; (f) $VSWR = 2,64$; (g) $VSWR = 2,64$.

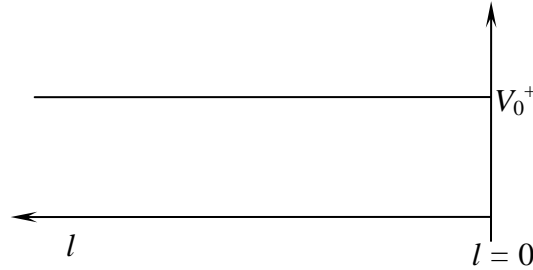
(a) $V_{\max} = V_{\min} = V_0^+$; (b) $V_{\max} = 3V_0^+/2$, $V_{\min} = V_0^+/2$; (c) $V_{\max} = 3V_0^+/2$, $V_{\min} = V_0^+/2$; (d) $V_{\max} = 2V_0^+$, $V_{\min} = 0$; (e) $V_{\max} = 2V_0^+$, $V_{\min} = 0$; (f) $V_{\max} = 1,45V_0^+$, $V_{\min} = 0,55V_0^+$; (g) $V_{\max} = 1,45V_0^+$, $V_{\min} = 0,55V_0^+$.

Posisi tegangan maksimum/minimum

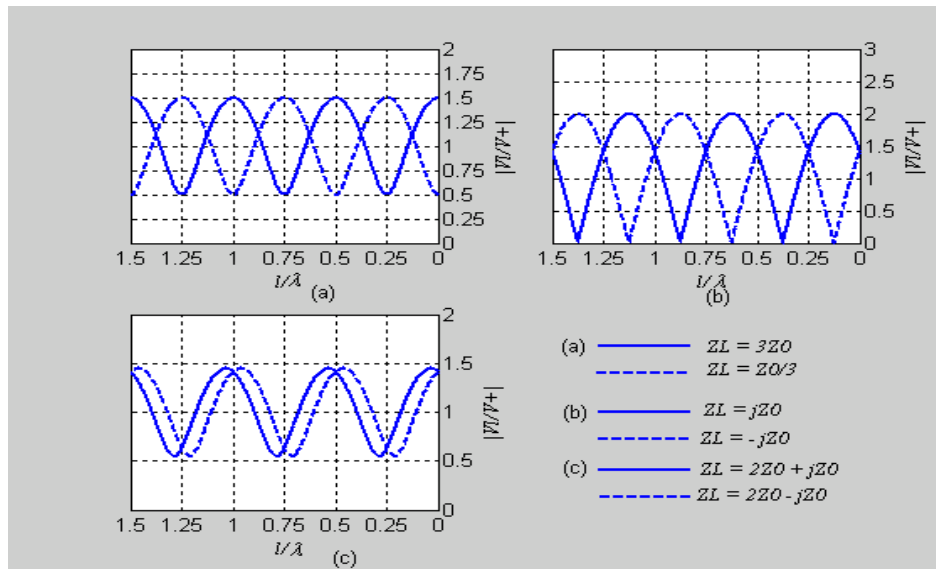
(a) tidak ada; (b) $l_{\max1} = 0$, $l_{\min1} = \lambda/4$; (c) $l_{\max1} = \lambda/4$, $l_{\min1} = 0$; (d) $l_{\max1} = \lambda/8$, $l_{\min1} = 3\lambda/8$; (e) $l_{\max1} = 3\lambda/8$, $l_{\min1} = \lambda/8$; (f) $l_{\max1} = 0,04\lambda$, $l_{\min1} = 0,29\lambda$; (g) $l_{\max1} = 0,29\lambda$, $l_{\min1} = 0,04\lambda$.

Pola gelombang berdiri

Pola gelombang berdiri untuk beban-beban di atas diperlihatkan pada Gambar 2.9 dan Gambar 2.10 di bawah ini.



Gambar 2.9 Pola gelombang untuk $Z_L = Z_0$



Gambar 2.10 Pola gelombang berdiri untuk contoh 2.3 (b) – (g)

Impedansi Saluran

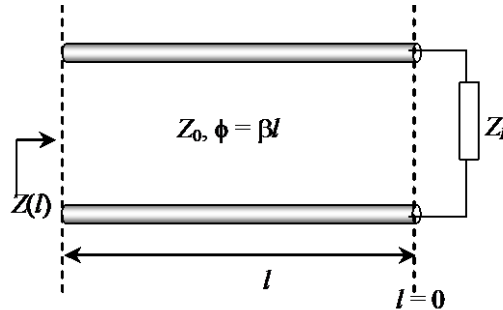
Gambar 2.11 memperlihatkan sebuah saluran yang diterminasi dengan beban Z_L . Tegangan dan arus berubah fasanya terhadap jarak dari beban. Impedansi saluran pada jarak l dari beban, merupakan perbandingan antara tegangan dan arus pada jarak tersebut, karenanya besar dan sudut dari impedansi juga berubah sesuai dengan perubahan tegangan dan arus. Impedansi saluran pada jarak l dari beban diperoleh dari (2.40)

$$Z(l) = \frac{V(l)}{I(l)} = Z_0 \frac{(Z_L + Z_0)e^{j\beta l} + (Z_L - Z_0)e^{-j\beta l}}{(Z_L + Z_0)e^{j\beta l} - (Z_L - Z_0)e^{-j\beta l}} \quad (2.55)$$

Jika ruas kanan kita bagi dengan $(Z_L - Z_0)e^{j\beta l}$, maka Persamaan (2.55) akan menjadi

$$Z(l) = Z_0 \frac{1 + \Gamma(l)}{1 - \Gamma(l)} \quad (2.56)$$

dengan $\Gamma(l)$ adalah koefisien pantul pada jarak l dan dinyatakan oleh (2.45).



Gambar 2.11 Impedansi saluran pada jarak l dari beban

Impedansi saluran juga dapat dinyatakan sebagai berikut: karena $e^{j\beta l} = \cos\beta l + j\sin\beta l$ dan $e^{-j\beta l} = \cos\beta l - j\sin\beta l$, maka

$$Z(l) = Z_0 \frac{Z_L(e^{j\beta l} + e^{-j\beta l}) + Z_0(e^{j\beta l} - e^{-j\beta l})}{Z_0(e^{j\beta l} + e^{-j\beta l}) + Z_L(e^{j\beta l} - e^{-j\beta l})}$$

dan dari identitas matematik di atas kita peroleh $e^{j\beta l} + e^{-j\beta l} = 2\cos\beta l$ dan $e^{j\beta l} - e^{-j\beta l} = j2\sin\beta l$. Jadi persamaan di atas sama dengan

$$Z(l) = Z_0 \frac{Z_L \cos \beta l + jZ_0 \sin \beta l}{Z_0 \cos \beta l + jZ_L \sin \beta l} \quad (2.57)$$

atau

$$Z(l) = Z_0 \frac{Z_L + jZ_0 \tan \beta l}{Z_0 + jZ_L \tan \beta l} \quad (2.58)$$

Hasil yang sama diperoleh untuk admitansi masukan pada jarak l dari beban

$$Y(l) = Y_0 \frac{Y_L + jY_0 \tan \beta l}{Y_0 + jY_L \tan \beta l} \quad (2.59)$$

dengan $Y_L = 1/Z_L$ adalah admitansi beban dan $Y_0 = 1/Z_0$ admitansi karakteristik saluran.

Saluran dengan panjang $\lambda/4$ dan $\lambda/2$

Saluran yang panjangnya seperempat panjang gelombang mengakibatkan $\beta l = \pi/2$ sehingga $\tan \beta l = \infty$. Dengan demikian impedansi dan admitansi masukan untuk saluran $\lambda/4$ adalah

$$Z_{\lambda/4} = Z_0 \lim_{\tan \beta l \rightarrow \infty} \frac{Z_L / \tan \beta l + jZ_0}{Z_0 / \tan \beta l + jZ_L} = \frac{Z_0^2}{Z_L} \quad (2.60)$$

$$Y_{\lambda/4} = \frac{Y_0^2}{Y_L} \quad (2.61)$$

Untuk saluran setengah panjang gelombang, $\beta l = \pi$ sehingga $\tan \beta l = 0$. Jadi impedansi dan admitansi masukan pada saluran $\lambda/2$ adalah

$$\begin{aligned} Z_{\lambda/2} &= Z_L \\ Y_{\lambda/2} &= Y_L \end{aligned} \quad (2.62)$$

Impedansi dan admitansi untuk saluran dengan beban short dan open circuit

Saluran yang ujung bebannya diterminasi dengan beban short circuit, $Z_L = 0$, akan memiliki impedansi masukan pada jarak l dari beban

$$Z_{sc} = jZ_0 \tan \beta l \quad (2.63)$$

sedangkan untuk beban open circuit, $Z_L = \infty$,

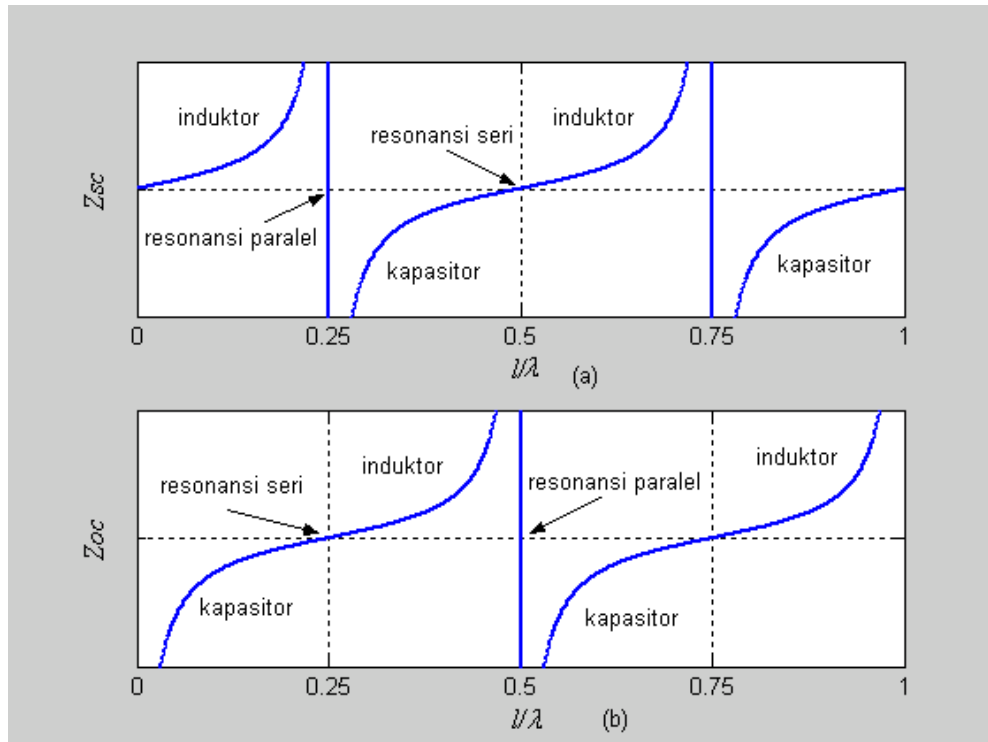
$$Z_{oc} = Z_0 \lim_{Z_L \rightarrow \infty} \frac{1 + jZ_0 \tan \beta l / Z_L}{Z_0 / Z_L + j \tan \beta l} = -jZ_0 \cot \beta l \quad (2.64)$$

Dari (2.63) dan (2.64) kita dapat menentukan impedansi karakteristik saluran secara praktis, yaitu:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{sc} Z_{oc}} \quad (2.65)$$

Grafik impedansi masukan untuk beban short dan open circuit sebagai fungsi jarak dari beban diperlihatkan pada Gambar 2.12

Dari Gambar 2.12 tersebut terlihat bahwa sifat impedansi masukan pada saluran seperempat panjang gelombang bersifat kebalikan untuk beban short circuit dan beban open circuit. Jika pada beban short circuit bersifat induktor, maka pada beban open circuit bersifat kapasitor. Jika pada short circuit bersifat resonansi paralel, maka pada open circuit bersifat resonansi seri. Sifat resonansi seri ditunjukkan dengan impedansi masukan berharga nol dan resonansi paralel impedansi masukan berharga ∞ .



Gambar 2.12 Grafik impedansi masukan untuk beban (a) $Z_L = 0$ dan (b) $Z_L = \infty$

Seperti telah disebutkan tegangan akan maksimum jika fasa kedua gelombang, gelombang dan gelombang pantul, sama atau kelipatan 2π . Pada keadaan ini arus akan minimum, karena koefisien pantul untuk arus berbedada 180° dari koefisien pantul tegangan; karena tegangan maksimum dan arus minimum, maka impedansi pada posisi-posisi ini akan maksimum. Jadi

$$Z_{\max} = \frac{V_{\max}}{I_{\min}} = \frac{|V^+| + |V^-|}{|I^+| - |I^-|} = \frac{|V^+|}{|I^+|} \frac{(1 + |\Gamma|)}{(1 - |\Gamma|)}$$

atau

$$Z_{\max} = Z_0 \times VSWR \quad (2.66)$$

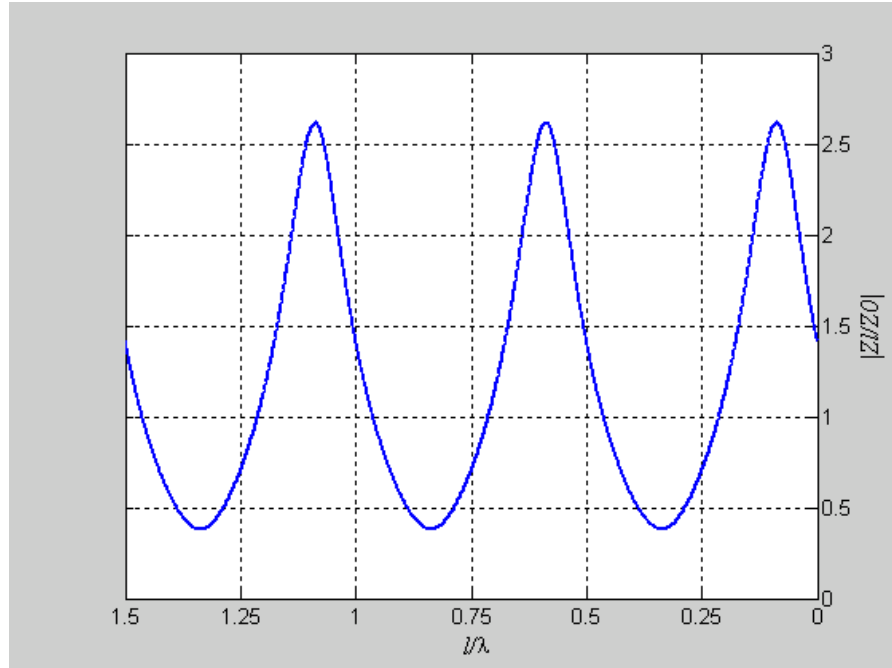
Sebaliknya pada posisi-posisi tegangan minimum, arus akan maksimum sehingga impedansi akan minimum, yaitu:

$$Z_{\min} = \frac{Z_0}{VSWR} \quad (2.67)$$

Contoh 2.4 menentukan impedansi pada jarak l dari beban

Plot impedansi masukan pada jarak l untuk beban $Z_L = Z_0 + jZ_0$.

Dengan menyelesaikan Persamaan (2.58) untuk berbagai nilai l , kemudian hasilnya diplot seperti pada Gambar 2.13 di bawah ini.



Gambar 2.13 Plot impedansi untuk contoh 2.4

2.3.2 Saluran Meredam

Pada saluran meredam (merugi), persamaan tegangan pada (2.49) menjadi

$$V = V_0^+ e^{\gamma l} \left(1 + \rho_L e^{-2\alpha l} e^{j(\theta - 2\beta l)} \right) \quad (2.68)$$

atau

$$V = V_0^+ e^{j\beta l} \left(e^{\alpha l} + \rho_L e^{-\alpha l} e^{j(\theta - 2\beta l)} \right) \quad (2.69)$$

Koefisien pantul untuk saluran yang meredam terlihat dari (2.68), karena $V = V^+(1 + \Gamma(l))$. Jadi

$$\Gamma(l) = |\Gamma| \angle \theta - 2\beta l \quad (2.70)$$

dengan

$$|\Gamma| = \rho_L e^{-2\alpha l} \quad (2.71)$$

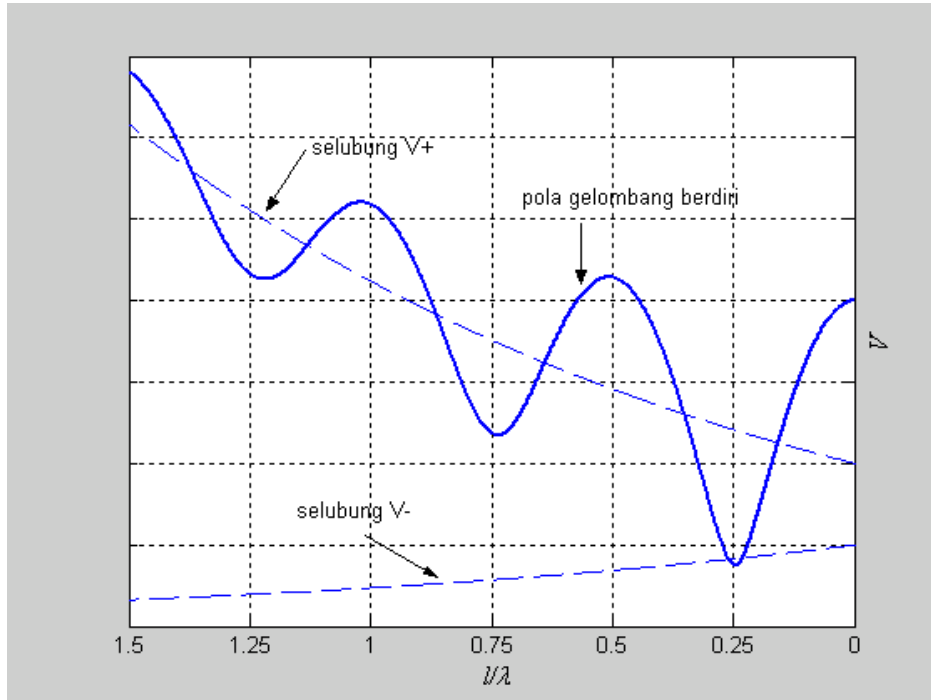
Pola gelombang berdiri diperoleh dari harga mutlak (2.69), yaitu

$$|V(l)| = |V_0^+| \left| e^{\alpha l} + \rho_L e^{-\alpha l} e^{j(\theta - 2\beta l)} \right| \quad (2.72)$$

dan hasilnya diplot pada Gambar 2.14. Pada gambar tersebut diplot selubung (harga mutlak) dari V^+ , V^- dan pola gelombang berdiri pada (2.72). Posisi-posisi terjadinya

tegangan maksimum dan tegangan minimum tidak berubah, sama seperti pada saluran tak meredam, hanya besarnya V_{\max} dan V_{\min} berubah,

$$\begin{aligned} V_{\max} &= |V_0^+| e^{\alpha l} (1 + \rho_L e^{-2\alpha l}) \\ V_{\min} &= |V_0^+| e^{\alpha l} (1 - \rho_L e^{-2\alpha l}) \end{aligned} \quad (2.73)$$



Gambar 2.14 Pola gelombang berdiri pada saluran meredam

Impedansi saluran pada (2.58) menjadi

$$Z(l) = Z_0 \frac{Z_L + Z_0 \tanh(\alpha l + j\beta l)}{Z_0 + Z_L \tanh(\alpha l + j\beta l)} \quad (2.74)$$

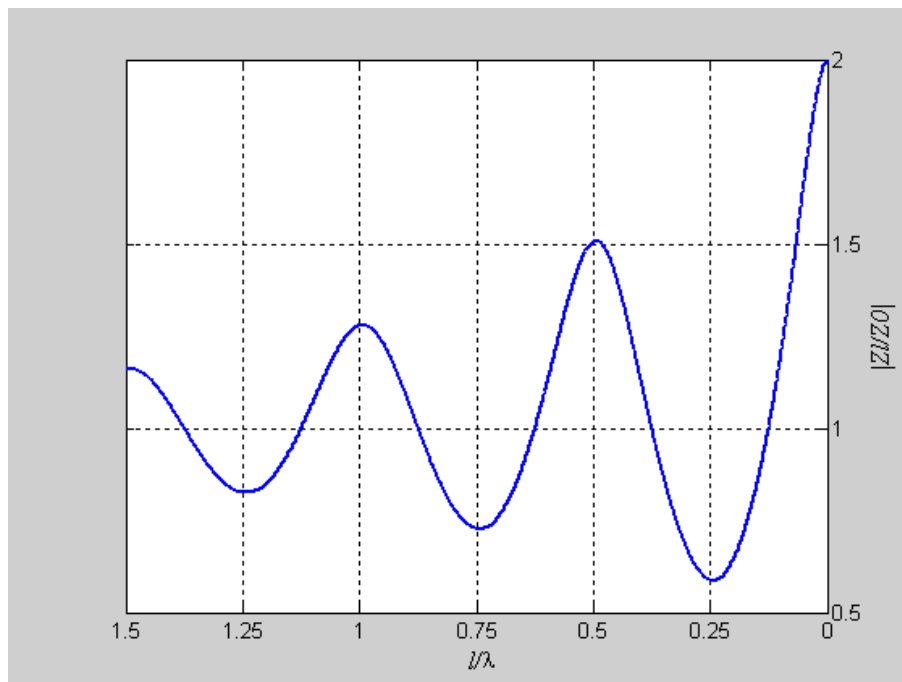
dan admitansinya adalah

$$Y(l) = Y_0 \frac{Y_L + Y_0 \tanh(\alpha l + j\beta l)}{Y_0 + Y_L \tanh(\alpha l + j\beta l)} \quad (2.75)$$

Contoh 2.5 Impedansi pada saluran meredam

Sebuah saluran dengan impedansi Z_0 , dihubungkan dengan beban $Z_L = 2Z_0$. Plot nilai impedansi sebagai fungsi jarak radi beban untuk saluran meredam. Gambar 2.15 memperlihatkan plot dari impedansi untuk contoh 2.5. Dari gambar tersebut impedansi akan makin mendekati Z_0 jika jarak dari beban makin jauh. Posisi-posisi impedansi maksimum terletak pada jarak $\lambda/2$ dan

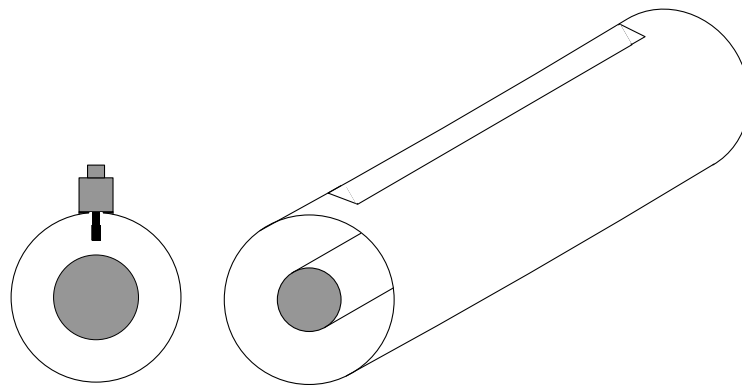
kelipatannya sedangkan impedansi minimum pada jarak $\lambda/4$ dan kelipatan ganjilnya.



Gambar 2.14 Plot impedansi sebagai fungsi jarak dari beban untuk contoh 2.5

2.3.3 Saluran Berslot

Saluran berslot adalah sebuah alat yang dapat *mentrace* pola medan listrik dalam saluran. Saluran berslot biasanya berupa saluran koaksial atau bumbung gelombang. Alat ini digunakan *mentrace* pola gelombang berdiri dalam saluran. Dari pola gelombang berdiri akan diketahui *VSWR*, kemudian dari *VSWR* akan didapat besarnya koefisien pantul, fasanya diperoleh dari posisi-posisi tegangan minimum atau tegangan maksimum. Akhirnya dari data-data ini kita dapat menentukan impedansi yang terhubung dengan saluran. Gambar 2.15 memperlihatkan gambar saluran berslot berupa saluran sesumbu.



Gambar 2.15 Saluran berslot

Dengan saluran berslot, $VSWR$, koefisien pantul, dan impedansi yang terukur hanya dapat dilakukan pada satu frekuensi. Untuk mengukur besaran-besaran tersebut pada frekuensi yang lain, maka kita harus mengeset sinyal generator pada frekuensi yang kita inginkan sehingga untuk mengukur respons besaran yang kita ukur terhadap frekuensi akan memakan waktu yang lama dan melelahkan. Sebenarnya, ada alat yang lebih canggih untuk mengukur besaran-besaran tersebut pada band frekuensi tertentu sekaligus, yaitu menggunakan *network analyzer*. Ada dua jenis *network analyzer*, yaitu: *scalar network analyzer* (SNA) dan *vector network analyzer* (VNA). Pada SNA yang dapat terukur secara langsung adalah respons dari koefisien pantul, atau *return loss*, dan koefisien transmisi. Dari *return loss* kita dapat menentukan $VSWR$ berdasarkan (2.54). Informasi impedansi beban tidak dapat diketahui, karena kita tidak mengetahui fasa dari koefisien pantul. Jika kita ingin mengetahui informasi impedansi beban kita harus menggunakan VNA.

Kelebihan-kelebihan SNA dan VNA tentu harus dibayar dengan harga yang sangat mahal. Kedua alat tersebut harganya sangat mahal. Saluran berslot adalah alat yang sangat sederhana dan dapat dibuat sendiri dengan bahan-bahan yang ada di pasaran, dan tidak sulit dalam perancangannya. Frekuensi kerja dari saluran slot kabel sesumbu ditentukan oleh kemampuan dia membawa sinyal dengan mode tunggal, yaitu mode TEM. Pada frekuensi yang lebih tinggi lagi akan timbul mode-mode lain yang lebih tinggi. Kemudian yang harus diingat lagi adalah pada prob saluran berslot harus dihubungkan dengan detektor selubung agar keluaran detektor tersebut berupa sinyal dc sehingga dapat diukur dengan osiloskop yang kemampuan frekuensinya tidak terlalu tinggi.

Masalah mode tinggi pada kabel sesumbu akan kita bahas pada bahasan khusus pada bab 3, mengenai bumbung gelombang, karena harus dilakukan analisis medan elektromagnetik. Mengenai pengukuran *return loss* menggunakan *network analyzer* akan kita bahas ketika kita membicarakan parameter hamburan pada bab 5. Pada bagian ini kita cukupkan dengan sebuah contoh bagaimana menentukan impedansi beban yang tidak diketahui dengan saluran berslot yang impedansi karakteristiknya diketahui.

Pengukuran impedansi beban dengan saluran berslot

Pengukuran impedansi beban dapat dilakukan dengan menggunakan saluran berslot tak meredam dan berimpedansi karakteristik Z_0 , dengan bantuan Persamaan (2.56) yang untuk beban menjadi

$$Z_L = Z_0 \frac{1 + \Gamma_L}{1 - \Gamma_L} \quad (2.76)$$

dengan $\Gamma_L = \rho_L \angle \theta$, dan ρ_L diperoleh dari $VSWR$, yaitu dari (2.54)

$$\rho_L = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \quad (2.77)$$

Sudut θ diperoleh dari jarak posisi tegangan minimum pertama dari beban. Posisi tegangan minimum dipilih karena lebih akurat daripada tegangan maksimum. Dari (2.52) diperoleh

$$\theta = \frac{4l_{\min 1}}{\lambda} \pi - \pi \quad (2.78)$$

Cara pengukuran

Pertama ujung beban dihubungkan dengan beban short cicuit, ujung yang lain dihubungkan dengan sumber yang frekuensinya f sehingga kita punya $\lambda = c/f$ (dielektrik slot adalah udara) kemudian ukur pola gelombang berdirinya dan plot. Beban short diperlukan, karena biasanya posisi beban tidak pas pada skala slot. Jika skala nol ada pada ujung slot, maka beban berada di sebelah kanan skala ini. Dengan beban short kita pastikan posisi beban dalam skala, karena dengan beban short pada beban akan terjadi tegangan minimum. Dengan mengetahui posisi tegangan minimum pada slot kita dapat menentukan posisi beban, karena jarak antara tegangan minimum adalah $\lambda/2$. Kemudian beban short kita ganti dengan beban yang akan diukur, lakukan langkah yang sama seperti pada beban short. Supaya lebih jelas kita lihat perhitungannya dengan contoh di bawah ini.

Contoh 2.6 Menentukan impedansi beban dengan saluran berslot

Sebuah saluran slot dengan impedansi karakteristik 50Ω kita gunakan mengukur impedansi beban Z_L yang belum diketahui. Langkah pengukuran kita lakukan dengan dua tahap:

1. Tahap pertama hubungkan beban short pada ujung beban, kita akan mendapatkan pola gelombang berdiri dengan $VSWR$ takberhingga seperti pada Gambar 2.16a.. Skala pada saluran berslot ditandai dengan angka 0, dan beban berada pada jarak d dari skala ini. Satuan skala adalah cm. Dari gambar tersebut terlihat tegangan minimum terukur pada posisi-posisi $l = 0,65, 2,65, 4,65$, dan $6,65$ cm. Mengingat jarak antar minimum yang berdekatan adalah $\lambda/2$, maka $\lambda = (2,65 - 0,65) \times 2 = 4$ cm. Pada beban, tegangan harus minimum, maka jarak minimum yang pertama ke beban haruslah $\lambda/2$. Jadi posisi beban ada pada $0,65 - 2 = -1,35$ cm, atau $1,35$ cm di kanan skala nol.
2. Ganti beban short dengan beban yang akan diukur. Misalkan hasilnya seperti pada Gambar 2.16b, maka berdasarkan (2.77)
- 3.

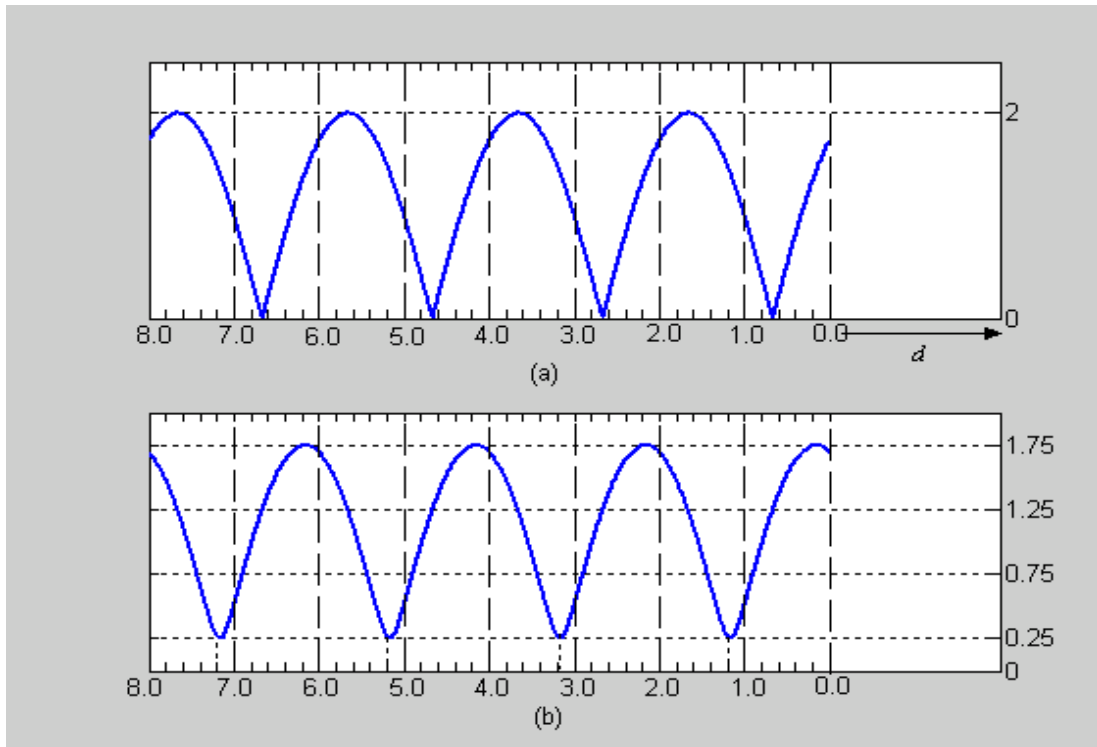
$$\rho_L = \frac{7-1}{7+1} = 0.75$$

karena $VSWR = V_{\max}/V_{\min} = 1,75/0,25 = 7$. Tegangan minimum pada skala terjadi pada posisi $1,2$ cm, padahal jarak beban ke skala nol adalah $1,35$ cm. Berarti jarak dari minimum tersebut ke beban adalah $l_{\min} = 1,2 + 1,35 = 2,55$ cm, atau $2,55/4 = 0,6375\lambda$. Jadi tegangan minimum pertama dalam saluran sebenarnya terjadi pada posisi $1,2 - 2 = -0,8$ ($0,8$ cm di belakang skala nol), atau $l_{\min 1} = 1,35 - 0,8 = 0,55$ cm dari beban. Berdasarkan (2.78)

$$\theta = \frac{4 \times 0,55}{4} \pi - \pi = 0.45\pi = -81^\circ$$

Dengan demikian $\Gamma_L = \rho_L \angle 81^\circ$ sehingga, berdasarkan (2.76)

$$Z_L = 50 \frac{1 + 0,75 \angle -81^\circ}{1 - 0,75 \angle -81^\circ} = (16,5 - j55,8) \Omega$$



Gambar 2.16 Pola gelombang berdiri untuk contoh 2.6 (a) beban short; (b) beban Z_L

Soal-soal Latihan

1. Sebuah saluran transmisi dengan parameter utama sebagai berikut: $L = 0,2 \mu\text{H/m}$, $C = 300 \text{ pF/m}$, $R = 5 \Omega/\text{m}$, dan $G = 0,01 \text{ S/m}$. Pada frekuensi 100 MHz, hitunglah konstanta propagasi dan impedansi karakteristik. Coba hitung besaran-besaran tersebut jika saluran tak meredam ($R = G = 0$).
2. Sebuah saluran koaksial dengan konduktor terbuat dari tembaga ($\sigma = 5,7 \times 10^7 \text{ S/m}$). Diketahui diameter konduktor dalam 1 mm dan diameter konduktor luar 3 mm. Dielektrik yang memisahkan kedua konduktor tersebut adalah $\epsilon_r = 2.56$. dengan tangen rugi-rugi 0,005. Hitung parameter R , L , G , dan C saluran ini pada frekuensi 3 GHz.
3. Hitung dan plot redaman dari saluran koaksial pada soal no.2, dalam dB/m, pada range frekuensi 1 MHz hingga 1 GHz.
4. Sebuah saluran tak meredam dengan panjang listrik $l = 0,3\lambda$ diterminasi dengan beban kompleks $Z_L = 40 + j20 \Omega$. Jika impedansi karakteristik saluran 75Ω tentukanlah: koefisien pantul pada beban, VSWR saluran, dan impedansi masukan dari saluran.
5. Sebuah saluran tak meredam diterminasi dengan beban 100Ω . Jika VSWR saluran adalah 1,5, hitung dua kemungkinan impedansi karakteristik saluran.