

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

Structura radiantă (antena) și echipamentul radio ca tot unitar

Întotdeauna funcționalitatea în ansamblu a unui echipament radio este condiționată și de interacțiunea acestuia cu antena sa. Antena poate fi privită ca interfață între emițător și mediu pe de o parte, și între mediu și receptor pe de alta. De buna funcționare a acestui element al lanțului de comunicație depind în foarte mare măsură performanțele globale și siguranța în funcționare a întregului sistem. O parte semnificativă a echipamentelor radio definite prin program sau virtuale conține antenele integrate constructiv în aceeași structură mecanică cu modulele radio și numerice, așa încât chiar proiectarea acestora din urmă ajunge să privească antena ca pe o componentă de circuit cu anumită specificitate. Asistăm în prezent la o intensă preocupare de analiză a diverselor structuri radiante pasive sau active, de emisie sau recepție, de bandă îngustă sau largă, în vederea cunoașterii mai precise a proprietăților lor, consolidarea unor metodologii de proiectare, depistarea celor mai adecvate variante pentru anumite aplicații. Proiectarea echipamentelor radio nu poate ignora acest domeniu de activitate întrucât proximitatea corpurilor inerte sau biologice din mediu, fixe sau mobile, ce conduc la variații nedorite ale caracteristicilor electromagnetice ale antenelor (caracteristica de directivitate, impedanța de intrare, eficiența de radiație, ...), în special a celor "electric mici", limitările fundamentale la care acestea se supun, pot conduce prin ignorare la concluzii greșite privind buna funcționare a sistemelor.

Pentru fixarea ideilor, figurile 1 – 8 prezintă un posibil model de sistem emisie-recepție asociat cu următorul set de definiții:

- **Cîmp** = ... Formă a materiei prin care are loc interacțiunea dintre particule. ([1])
- **Undă radio** = Undă electromagnetică care se propagă în spațiu fără ghid artificial și având prin convenție o frecvență mai mică decât 3.000 GHz. ([3])
- **Semnal** = Variație în timp a unei caracteristici a unui fenomen fizic, folosită pentru transportul informației. ([2])
- **Semnal radio(electric)** = Modificare a valorilor parametrilor componentelor electrice și magnetice ale unei unde radio, ca urmare a variațiilor semnalului modulator aplicat emițătorului. Fiecare semnal radioelectric este compus din semnale radioelectrice armonice elementare (definite prin amplitudine, frecvență și fază inițială), care constituie spectrul radioelectric al respectivului semnal.
- **Structură radiantă** = Structură materială care interacționează (generează, absoarbe sau modifică) cu undele radio.
- **Port (al unei structuri radiante)** = Domeniu/regiune de referință în/la care se poate aplica teoria circuitelor (cu parametri concentrați sau distribuiți, monomod sau multimod), semnalele fiind identificabile prin tensiuni și/sau curenți.

Structura radiantă a subsistemului de recepție este modelată generalizat ca un număr de N antene a căror semnale de ieșire $s_{A0}(t) \dots s_{A(N-1)}(t)$ sînt transferate printr-o rețea de distribuție la intrări multiple ale blocului de recepție care produce atît semnalul demodulat $d(t)$ cît și semnalele necesare unui bloc care estimează direcția de incidență (azimut $a_0 \dots a_{P-1}$, elevație $e_0 \dots e_{P-1}$) a diferitelor P componente ale undei radio (directă, reflectate, refractate, difractate și difuzate).

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

Emițător radio = Aparat care produce energie de radio-frecvență în scopul radiocomunicației.

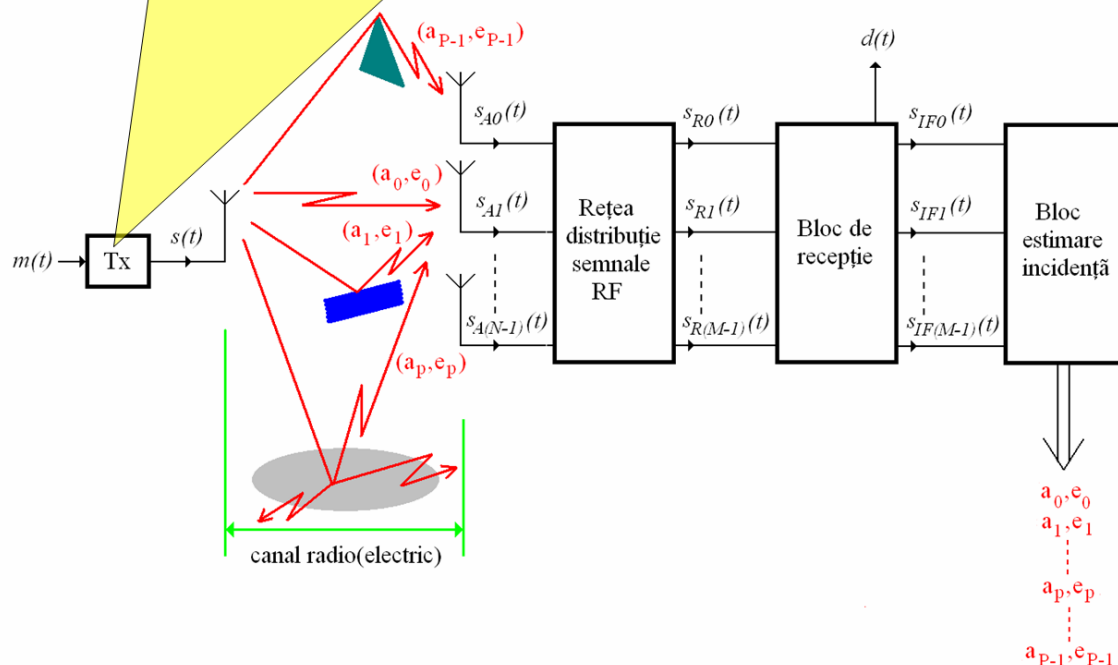


Figura 1

Semnal electric = Semnalele identificabile prin tensiuni și/sau curenți de natură electrică.

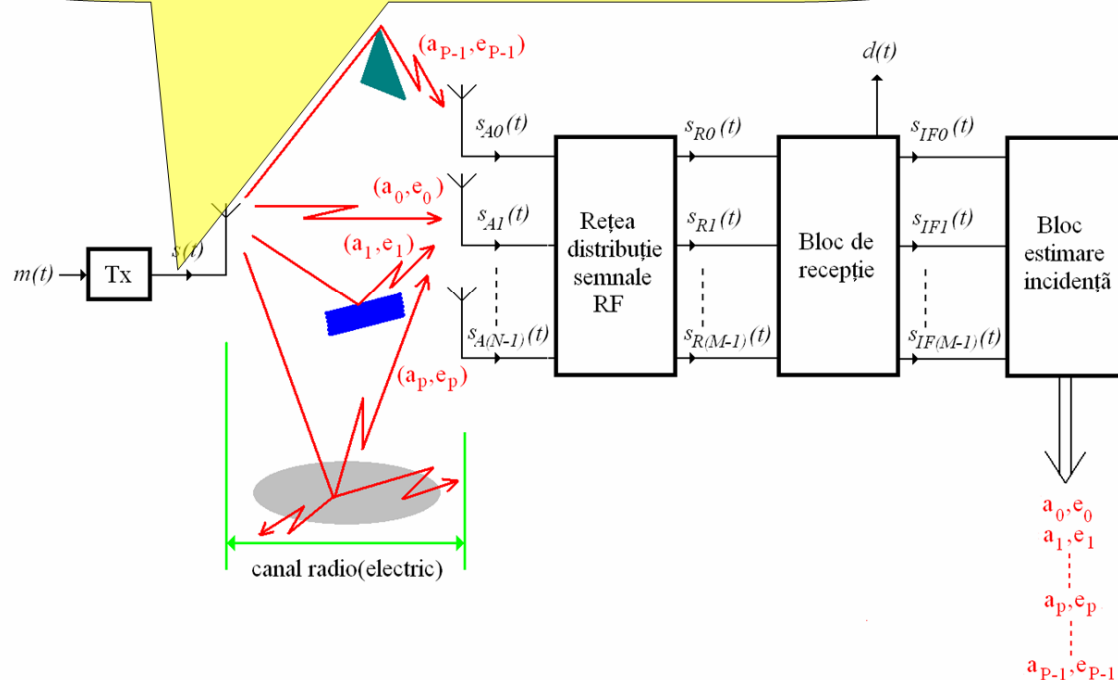


Figura 2

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

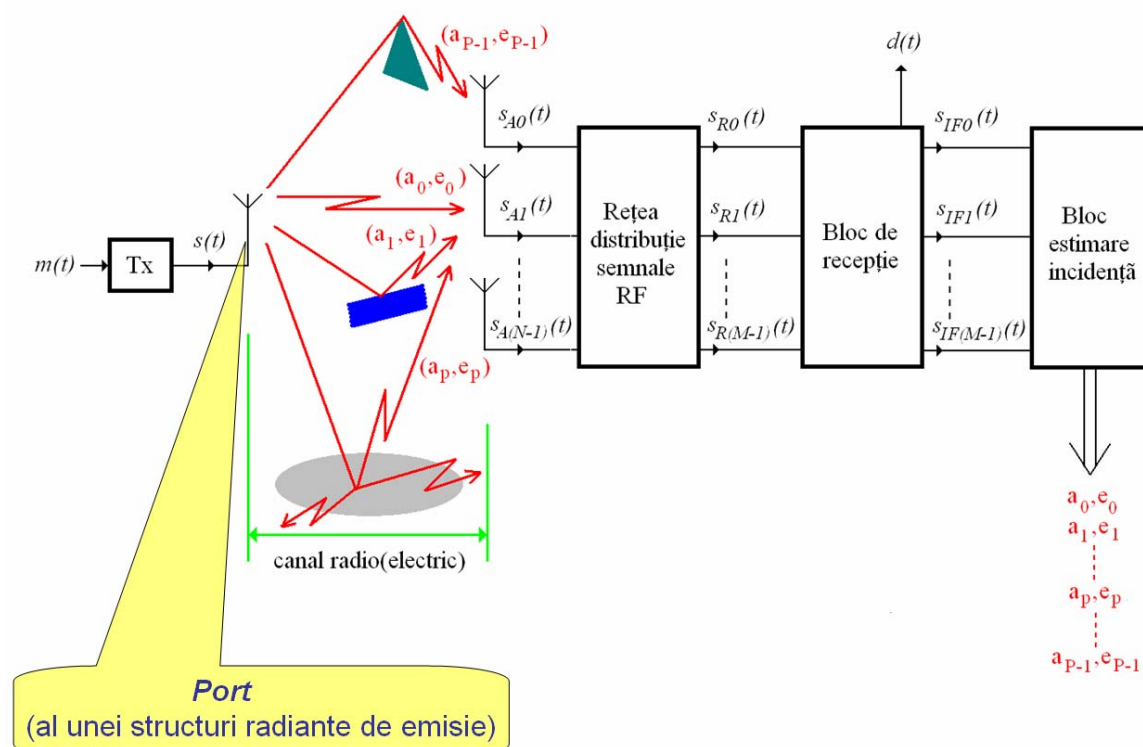


Figura 3

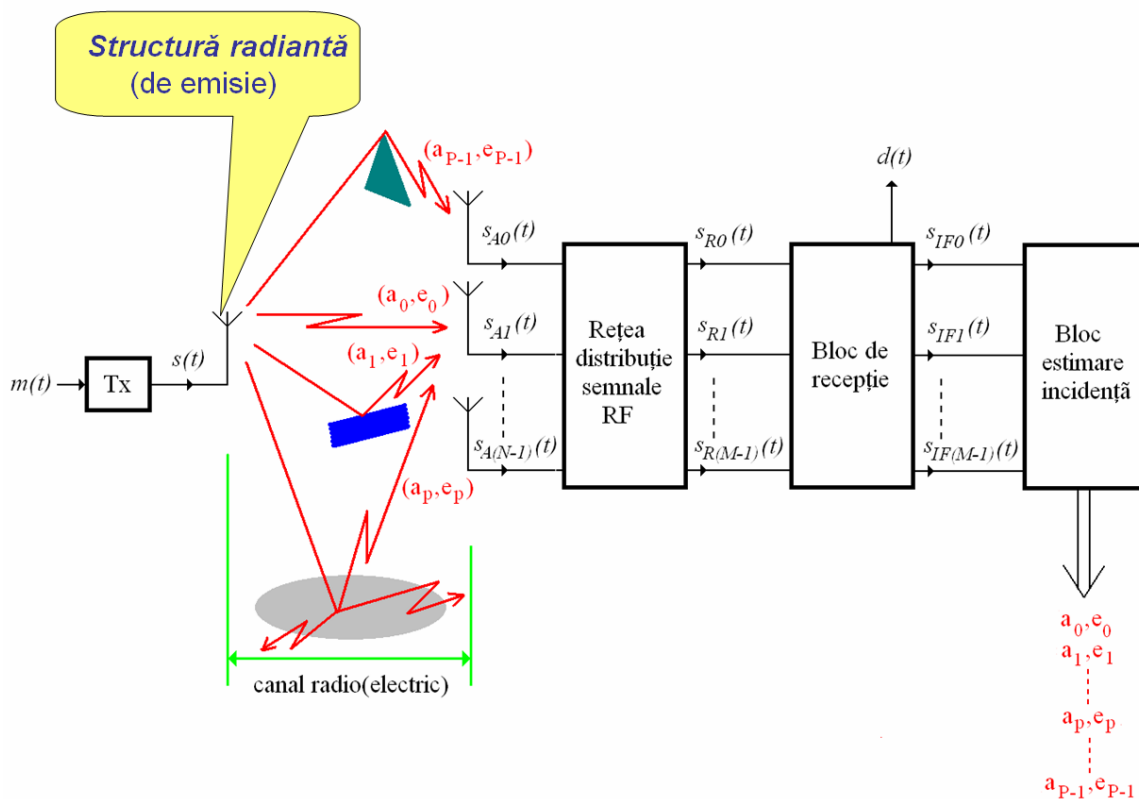


Figura 4

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

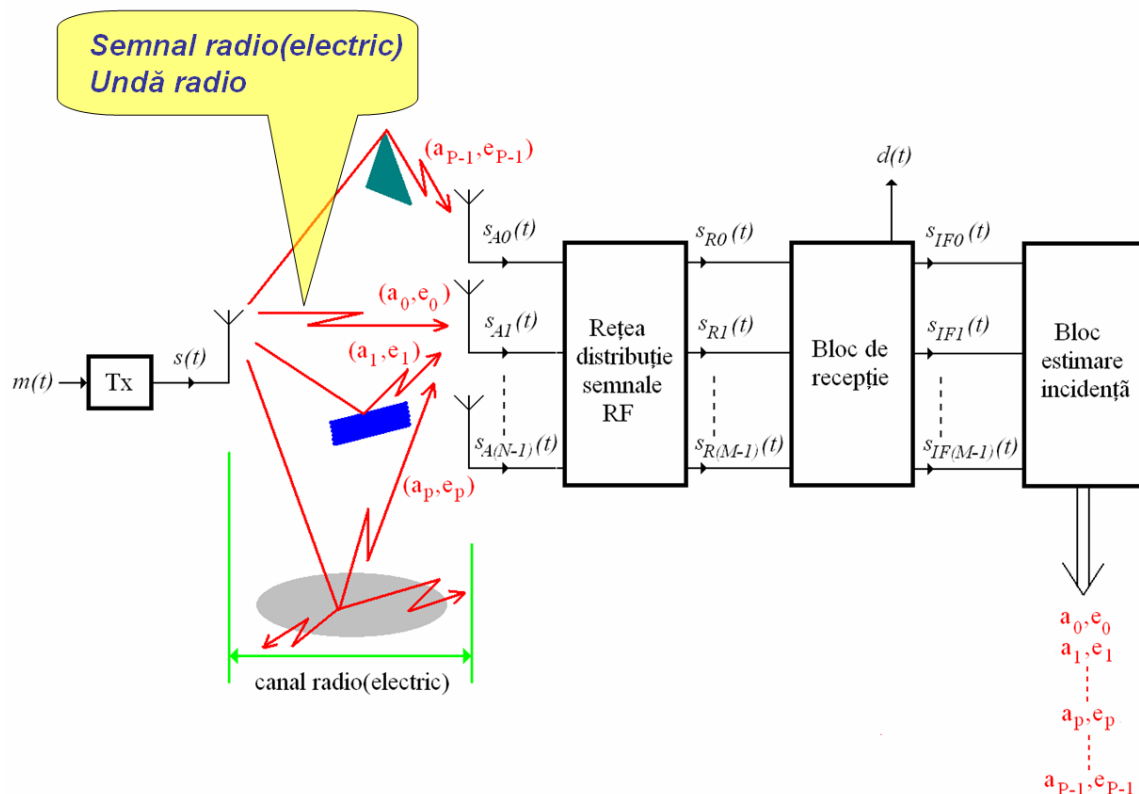


Figura 5

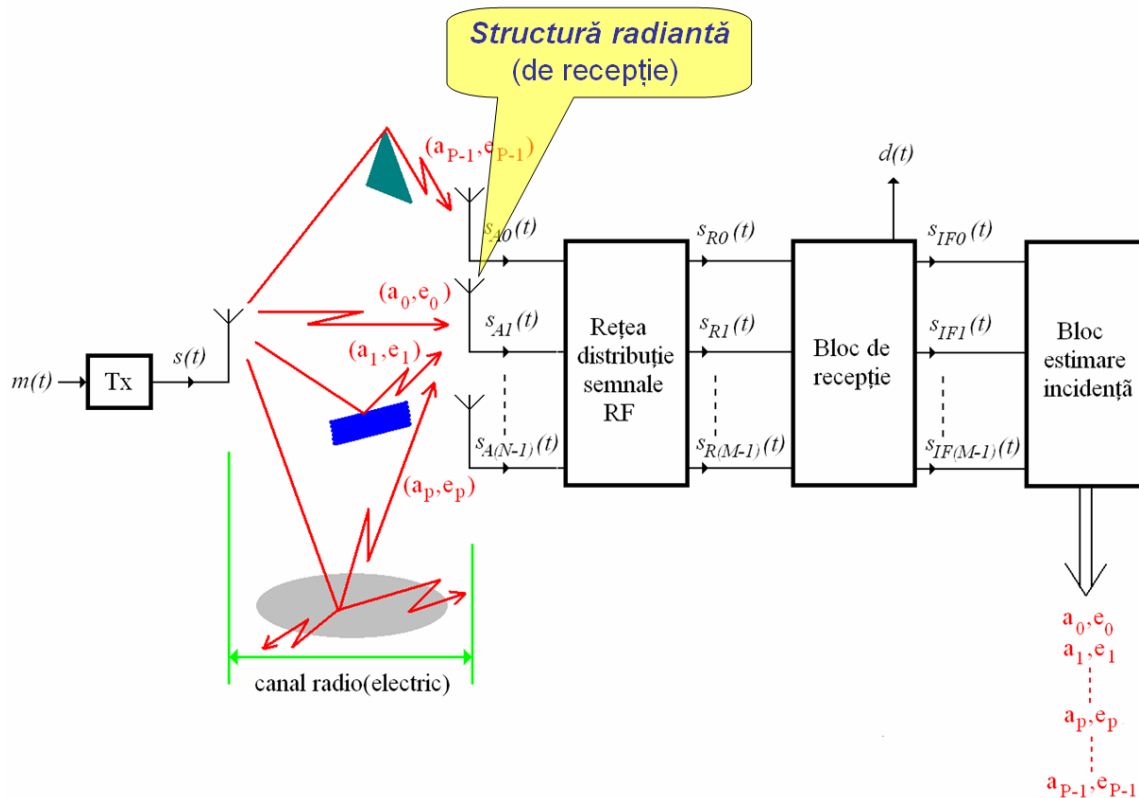


Figura 6

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

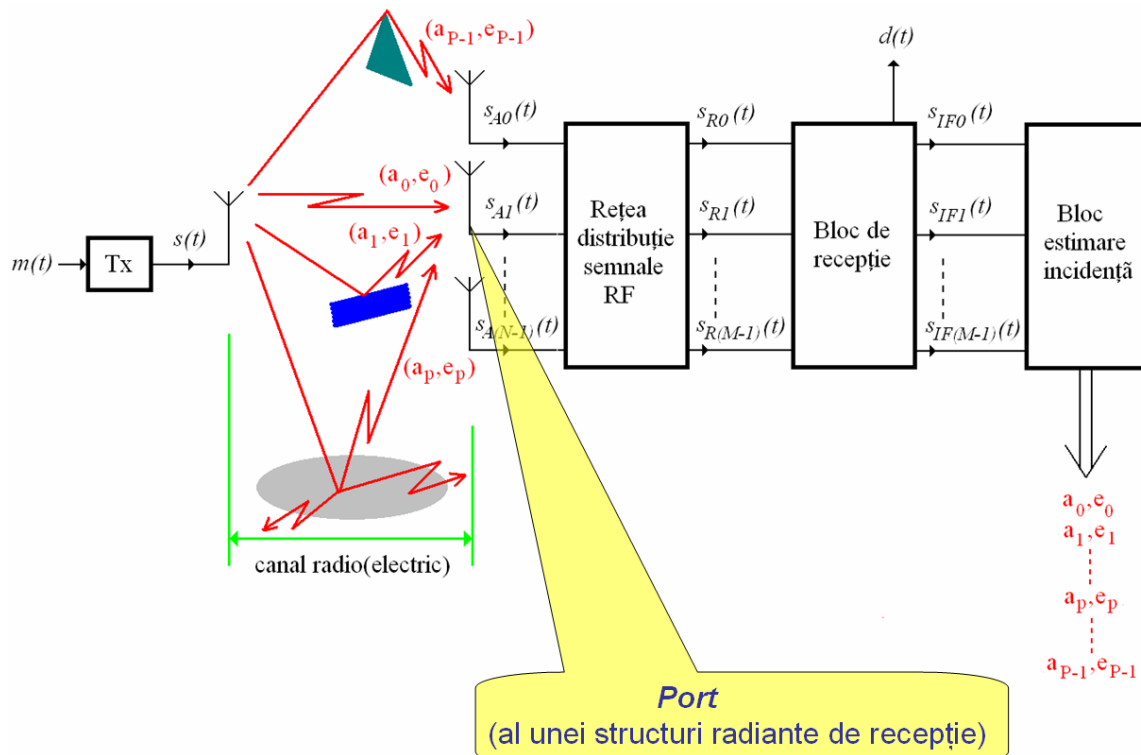


Figura 7

Semnal electric = Semnalele identificabile prin tensiuni și/sau curenți de natură electrică.

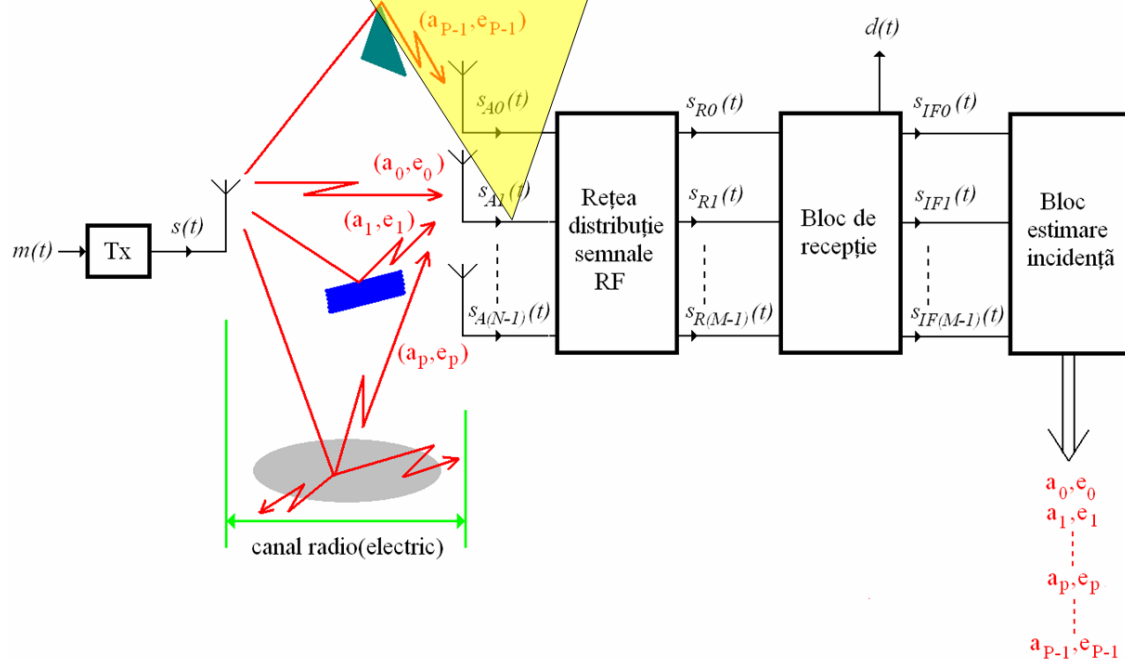


Figura 8

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

Forma utilă a semnalelor în analiza fenomenului de radiație și propagare a undelor radio, de exemplu cel emis $s(t)$, se obține considerându-le ca superpoziție de semnale elementare armonice în timp, în cazul acestui exemplu $s(\omega, t)$, a căror amplitudine, $a(\omega)$, și exces de fază, $\varphi(\omega)$, pot fi reunite într-o amplitudine complexă, $\underline{A}(\omega)$.

$$s(t) = \int_0^{+\infty} s(\omega, t) d\omega$$

$$s(\omega, t) = a(\omega) \cos[\omega t - \varphi(\omega)]$$

$$= \text{Re}\{\underline{A}(\omega) e^{j\omega t}\}$$
(1)

În general, suprafața totală S a unei structuri radiante este compusă din două părți, exemplificate în figurile 9 și 10:

- S^c - o combinație de materiale conductoare sau dielectrice care formează în principal corpul structurii, având părți optimizate pentru interacțiunea eficientă cu câmpul electromagnetic exterior, și care în general ecranează dispozitivele electronice interioare care generează și prelucrează semnale electrice;
- S^s - suprafața prin care nucleul activ al structurii radiante (care generează și prelucrează semnale electrice) comunică cu mediul exterior.

Structurile radiante trebuie tratate ca un tot unitar, neseparând antena propriuzisă de sursa ei de excitație sau sarcină pe care o considerăm ecranată (așa cum este în general), și de legătura dintre ele materializată printr-un ghid de undă metallic uniform închis (de multe ori biconductor, coaxial).

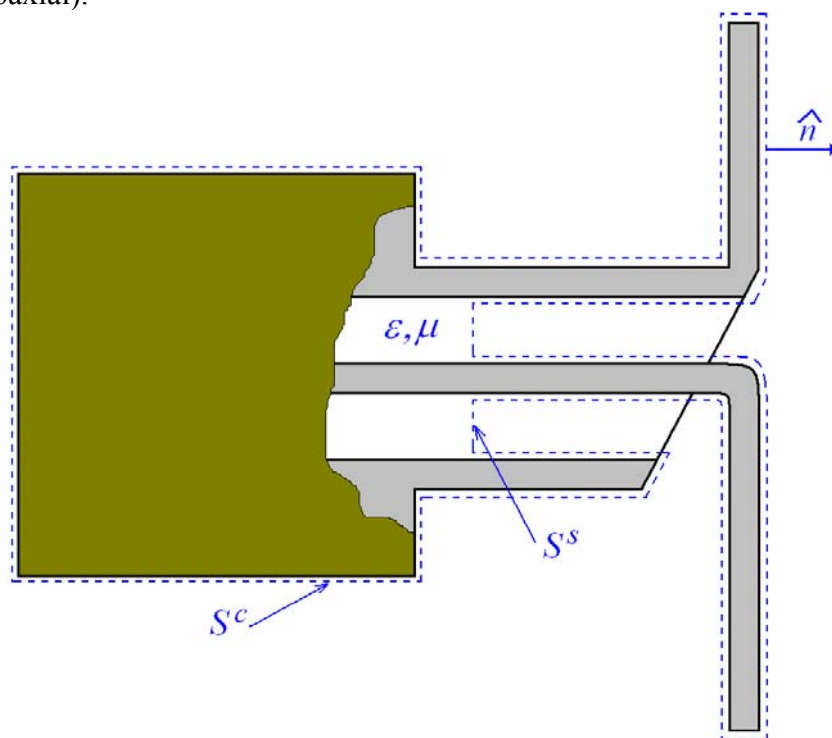


Figura 9

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

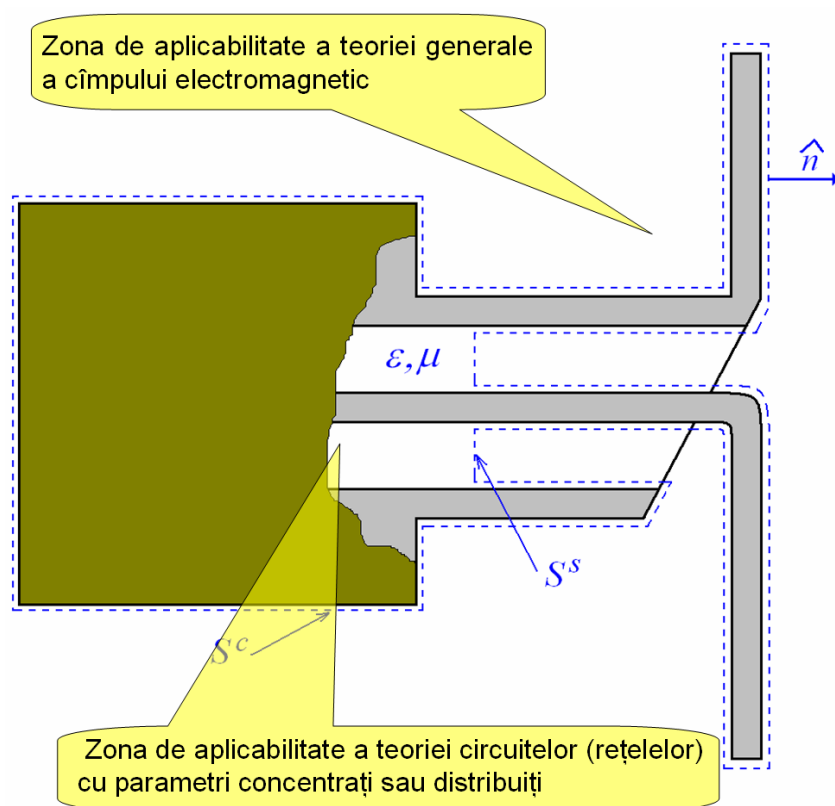


Figura 10

La un ghid de undă care este în contact la unul din capetele sale, cu mediul exterior structurii radiante, se poate stabili acea secțiune transversală S^s care este cea mai apropiată de capătul ghidului și în punctele căreia este încă prezent numai modul care se propagă în zona centrală a ghidului. Suprafața acestei secțiuni din ghid reprezintă prin convenție un **port al structurii radiante**, detaliat în figura 11. Pentru $z > z_{port}$ (zona roșie din figură) apar moduri superioare cu constantă de propagare reală sau complexă, a căror intensități variază rapid, și care se determină în procesul de analiză a proprietăților radiante ale structurii odată cu distribuția câmpului (curenților și sarcinilor) pe suprafața exterioară a structurii, S^c .

Se știe ([4]) din teoria generală a ghidurilor că în punctele M ale suprafeței $z = constant$ amplitudinile complexe ale intensităților câmpului electric, $\vec{E}(M, \omega)$, și magnetic, $\vec{H}(M, \omega)$, sînt exprimabile sub forma (2) în care x și y sînt coordonate transversale, mărimile $V(z, \omega)$ și $I(z, \omega)$ (ce sînt definite prin aceste relații) sînt coeficienți scalari, în general complecși, care pentru o excitație dată sînt funcție numai de z , iar $\vec{e}^o(x, y)$ și $\vec{h}^o(x, y)$ sînt funcții vectoriale de distribuție transversală, caracteristice modului implicat.

$$\begin{aligned}\vec{E}(M, \omega) &= V(z, \omega) \vec{e}^o(x, y) \\ \vec{H}(M, \omega) &= I(z, \omega) \vec{h}^o(x, y)\end{aligned}\quad (2)$$

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

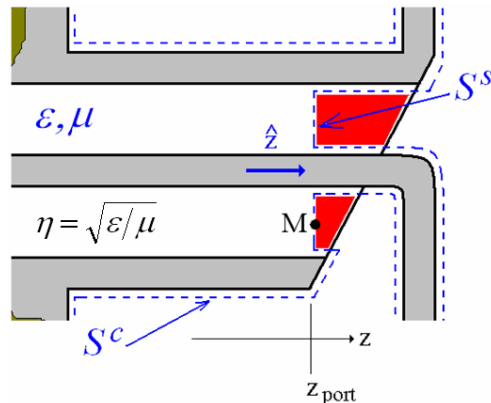


Figura 11

Ecuatiile lui Maxwell nu pot preciza cum se alocă factorii numerici între $V(z, \omega)$ și $\vec{e}^o(x, y)$ pe de o parte, și între $I(z, \omega)$ și $\vec{h}^o(x, y)$ pe de alta. Aceasta este o problemă de normalizare, iar normalizarea este o chestiune de convenție. În cadrul acestui proces (de normalizare) este permis și totodată convenabil ca funcțiile $\vec{e}^o(x, y)$ și $\vec{h}^o(x, y)$ să fie alese reale. Conform unei proceduri generale ([4]), care permite normalizarea funcțiilor $\vec{e}^o(x, y)$ și $\vec{h}^o(x, y)$ pînă la alegerea unui semn, se formulează două condiții. Prima condiție este cea de “normalizare a puterii”:

$$\frac{1}{2} \iint_{z=\text{constant}} [\vec{e}^o(x, y) \times \vec{h}^o(x, y)] \cdot \hat{z} da = W^o \quad (3)$$

Condiția a doua este cea de “normalizare a impedanței”, și se bazează pe proporționalitatea ce există în orice ghid între $\vec{h}^o(x, y)$ și $\hat{z} \times \vec{e}^o(x, y)$. Ea se poate formula astfel:

$$\vec{h}^o(x, y) = \sqrt{\frac{\epsilon}{\mu}} Z_o \left[\hat{z} \times \vec{e}^o(x, y) \right] \quad (4)$$

unde, Z_o este constanta de normalizare a impedanței, reală și pozitivă dar altminteri arbitrară.

Deși în general se pot alege constante W^o diferite pentru diversele ghiduri, se obișnuiește folosirea unei valori comune, și anume $W^o = 1/2$. În ceea ce privește constanta Z_o , ea se pot lua egală cu impedanța caracteristică ale modului T.E.M. în ghidul respectiv. În felul acesta, V și I se identifică (dimensional și numeric pînă la alegerea unui semn) cu amplitudinile complexe ale tensiunii și curentului definite în mod convențional prin integrale de linie, în cadrul teoriei clasice a liniilor de transmisiune, realizîndu-se legătura între teoria circuitelor cu parametri concentrați sau distribuiți aplicată la proiectarea echipamentului radio propriu-zis și teoria cîmpului electromagnetic aplicabilă structurilor radiante.

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

În oricare punct M al mediul extern echipamentului radio și structurii radiante asociat lui, considerat omogen, izotrop și liniar, sînt valabile ecuațiile lui Maxwell (5) și cele constitutive (6).

$$\nabla \times \vec{E}(M, \omega) = -\vec{M}_i(M, \omega) - \vec{M}_c(M, \omega) - j\omega \vec{B}(M, \omega) \quad (5)$$

$$\nabla \times \vec{H}(M, \omega) = \vec{J}_i(M, \omega) + \vec{J}_c(M, \omega) + j\omega \vec{D}(M, \omega)$$

$$\nabla \cdot \vec{D}(M, \omega) = \rho_i(M, \omega) + \rho_c(M, \omega)$$

$$\nabla \cdot \vec{B}(M, \omega) = \tau_i(M, \omega) + \tau_c(M, \omega)$$

$$\vec{D}(M, \omega) = \underline{\varepsilon}(M) \vec{E}(M, \omega)$$

$$\vec{H}(M, \omega) = \underline{\mu}(M)^{-1} \vec{B}(M, \omega)$$

$$\vec{J}_c(M, \omega) = \sigma_e(M) \vec{E}(M, \omega) \quad (6)$$

$$\vec{M}_c(M, \omega) = \sigma_m(M) \underline{\mu}(M)^{-1} \vec{B}(M, \omega)$$

$$\underline{\varepsilon}(M) = \varepsilon'(M) - j\varepsilon''(M)$$

$$\underline{\mu}(M) = \mu'(M) - j\mu''(M) \quad (7)$$

unde diversele mărimi au următoarele semnificații:

$\vec{E}(M, \omega)$ - amplitudinea complexă a intensității câmpului electric [Volt/metru]

$\vec{H}(M, \omega)$ - ... a intensității câmpului magnetic [Amper/metru]

$\vec{D}(M, \omega)$ - ... a densității de flux electric [Culomb/metru²]

$\vec{B}(M, \omega)$ - ... a densității de flux magnetic [Weber/metru²]

$\vec{J}_i(M, \omega)$ - ... a densității de curent electric imprimat [Amper/metru²]

$\vec{J}_c(M, \omega)$ - ... a densității de curent electric de conducție [Amper/metru²]

$\vec{M}_i(M, \omega)$ - ... densității de curent magnetic imprimat fictiv [Volt/metru²]

$\vec{M}_c(M, \omega)$ - ... densității de curent magnetic de conducție fictiv [Volt/metru²]

$\rho_i(M, \omega)$ - ... densității de sarcină electrică imprimată [Culomb/metru³]

$\rho_c(M, \omega)$ - ... densității de sarcină electrică de conducție [Culomb/metru³]

$\tau_i(M, \omega)$ - ... densității de sarcină magnetică imprimată fictivă [Weber/metru³]

$\tau_c(M, \omega)$ - ... densității de sarcină magnetică de conducție fictivă [Weber/metru³]

$\underline{\varepsilon}(M)$ - permitivitatea electrică complexă [Farad/metru]

$\underline{\mu}(M)$ - permitivitatea magnetică complexă [Henry/metru]

$\sigma_e(M)$ - conductivitatea electrică [Siemens/metru]

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

$\sigma_m(M)$ - conductivitatea magnetică fictivă [Ohm/metru]

Este util un comentariu privind mărimile implicate. Prin **curent electric** ne referim la **sarcină electrică** în mișcare. Concret, densitatea macroscopică volumică de curentului electric se obține prin medierea spațială a deplasării sarcinilor electrice. Mișcarea sarcinilor electrice poate fi asociată cu forțe externe și cu fluctuațiile microscopice ale poziției lor. Mișcarea particulelor izolate încărcate electric (pozitive și negative) și a corpurilor izolatoare încărcate electric constituie **curenți de convecție**. Electronii încărcăți negativ aflați în mișcare pe fundalul rețelei pozitive dintr-un conductor constituie **curentul de conducție**. Un al treilea tip de curent, numit **curent electrolitic**, rezultă prin scurgerea ionilor pozitivi sau negativi printr-un fluid. În plus față de clasificarea simplă de mai sus, curenții se pot clasifica în **primari** sau **secundari**, în funcție de factorul care pune sarcinile în mișcare. Curenții **primari**, sau **"imprimați"**, sînt independenți de câmpurile pe care le produc, pe cînd cei **secundari** rezultă din interacțiunea dintre **cîmpuri sursă** și mediul în care există respectivele câmpuri. Cel mai familiar exemplu de curent **secundar** este curentul de conducție care apare într-un mediu conductor prin aplicarea unui câmp electric extern. Conceptul de **sursă imprimată** este în particular important în teoria circuitelor, unde surse independente de tensiune sînt modelate ca furnizînd excitații de tensiune primare care sînt independente de sarcina aplicată. Astfel ele diferă de sursele secundare sau "dependente" care reacționează la efectele produse de aplicarea surselor primare. În electromagnetismul practic sursele primare pot fi atît de îndepărtate încît efectele inverse (de răspuns) rezultate din interacțiunea locală a câmpului său imprimat poate fi ignorată. Alte exemple de surse primare includ tensiunea de la intrarea unei antene, curentul unei probe introduse într-un ghid, și curenții care produc câmpul din jurul liniilor de alimentare cu energie electrică în care este introdus un corp biologic.

Se consideră o regiune mărginită V a spațiului, ca în figura 12. Regiunea V este mărginită de o suprafață S , care poate fi multiplu conexă în așa fel încît S este o reuniune a cîteva suprafețe închise netede pe porțiuni S_i ($i=1,2, \dots$), fiecare putînd fi combinații de suprafețe de tip S^S și S^C ca în figura 9, și suprafața exterioară S_{ext} (deci V este simplu conex). Orientarea pozitivă a suprafețelor este spre interiorul domeniului (normala \hat{n} la aceste suprafețe fiind orientată spre interiorul lui V). În cazul radiației în spațiul liber suprafața S_{ext} se extinde spre infinit, iar orice contribuție a câmpului de pe această suprafață la câmpul dintr-un punct aflat la distanță finită de originea sistemului de referință din punctul O este nulă, și în plus sursele electrice și magnetice imprimate se găsesc numai în exteriorul închiderii domeniului V .

Cînd pe întreaga suprafață de frontieră a domeniului V componentele tangențiale ale intensității câmpului electric și intensității câmpului magnetic sînt continue, valorile acestora în punctul de observație M aflat pe închiderea domeniului se obțin ca rezultat al ecuațiilor integro-diferențiale (9) și (10) în care \underline{G} este funcția Green pentru spațiul liber iar γ este constanta de propagare a mediului. În cele mai multe situații practice ecuațiile nu se pot rezolva pe cale analitică, cele mai multe metode de rezolvare aproximativă numerică derivînd din metoda generală a momentelor [7].

Dacă distanța dintre suprafețele S_i (suprafețe de antene) este foarte mare în comparație cu lungimea de undă în mediul domeniului V câmpurile electromagnetice produse în

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

apropierea uneia dintre suprafețe de către celelalte, numite uzual câmpuri incidente, au structura de unde plane (12) în care \underline{Z} este impedența de undă a mediului.

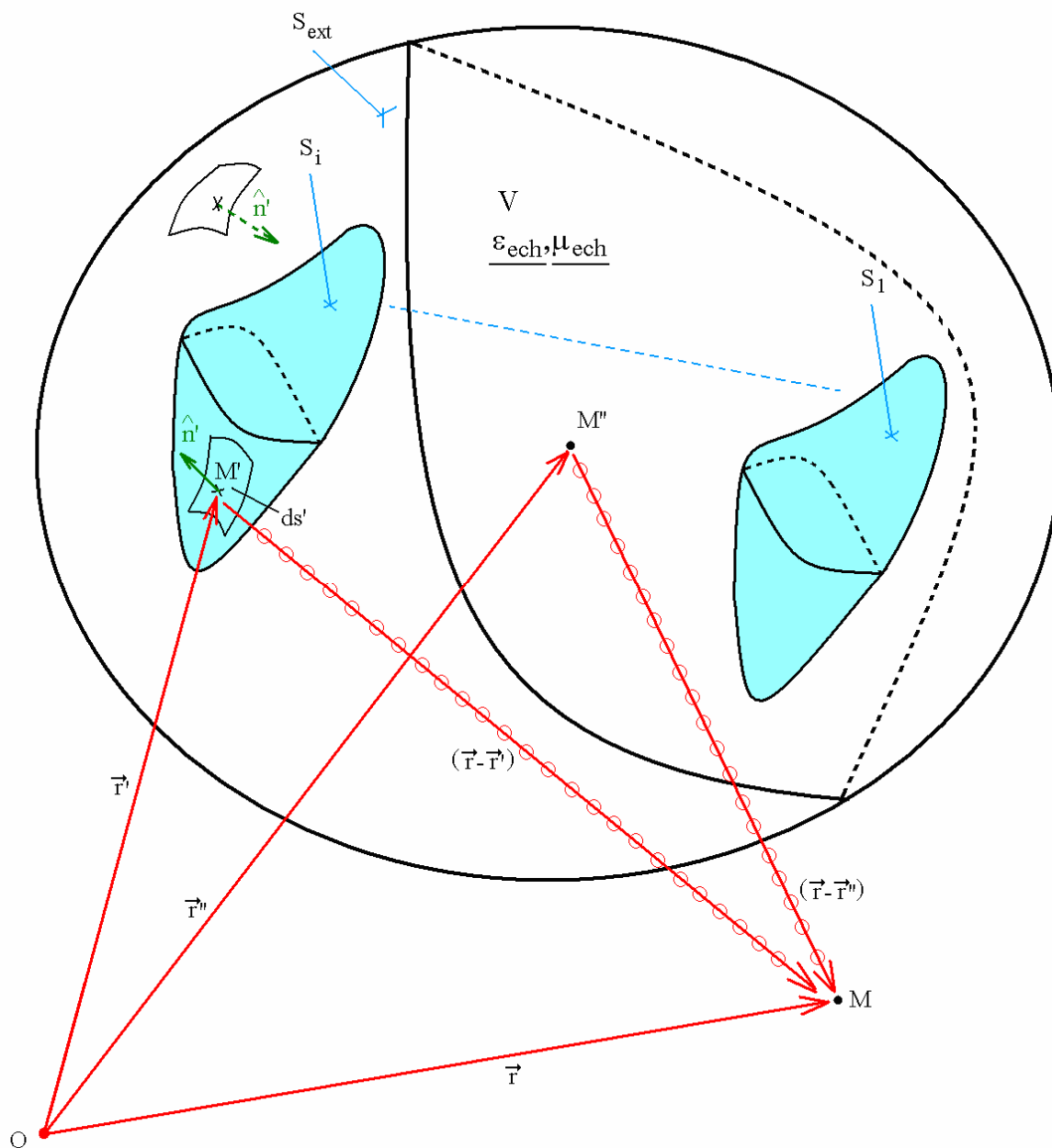


Figura 12

$$\begin{aligned}\underline{\varepsilon}_{ech} &= \varepsilon' - j \left(\frac{\sigma_e}{\omega} + \varepsilon'' \right) \\ \underline{\mu}_{ech} &= \mu' - j \left(\frac{\sigma_m}{\omega} + \mu'' \right)\end{aligned}\quad (8)$$

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

$$\oint_S \left\{ \begin{aligned} & [\hat{n}' \times \vec{E}(\vec{r}')] \times \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}') + [\hat{n}' \cdot \vec{E}(\vec{r}')] \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}') - \\ & - j\omega \underline{\mu}_{ech} [\hat{n}' \times \vec{H}(\vec{r}')] G(\vec{r}, \vec{r}') \end{aligned} \right\} ds' = \begin{cases} 0 & \forall M \notin V \cup S \\ \vec{E}(\vec{r}) & \forall M \in V \\ \frac{1}{2} \vec{E}(\vec{r}) & \forall M \in S_+ \\ -\frac{1}{2} \vec{E}(\vec{r}) & \forall M \in S_- \end{cases} \quad (9)$$

$$\oint_S \left\{ \begin{aligned} & [\hat{n}' \times \vec{H}(\vec{r}')] \times \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}') + [\hat{n}' \cdot \vec{H}(\vec{r}')] \nabla' G(\vec{r}, \vec{r}') + \\ & + j\omega \underline{\epsilon}_{ech} [\hat{n}' \times \vec{E}(\vec{r}')] G(\vec{r}, \vec{r}') \end{aligned} \right\} ds' = \begin{cases} 0 & \forall M \notin V \cup S \\ \vec{H}(\vec{r}) & \forall M \in V \\ \frac{1}{2} \vec{H}(\vec{r}) & \forall M \in S_+ \\ -\frac{1}{2} \vec{H}(\vec{r}) & \forall M \in S_- \end{cases} \quad (10)$$

$$\underline{G}(\vec{r}, \vec{r}') = \frac{\exp\left(-\gamma \left| \vec{r} - \vec{r}' \right| \right)}{4\pi \left| \vec{r} - \vec{r}' \right|} \quad (11)$$

$$\underline{\gamma} = j\omega \sqrt{\underline{\epsilon}_{ech} \underline{\mu}_{ech}}$$

$$\begin{aligned} \vec{E}(\vec{r}) &= -\underline{Z} [\hat{r} \times \vec{H}(\vec{r})] \\ \vec{H}(\vec{r}) &= \frac{1}{\underline{Z}} [\hat{r} \times \vec{E}(\vec{r})] \\ \underline{Z} &= \sqrt{\frac{\underline{\mu}_{ech}}{\underline{\epsilon}_{ech}}} \end{aligned} \quad (12)$$

O structură radiantă poate avea un număr de P porturi (în general $P \geq 0$, dar dacă structurile radiante sînt asociate emițătoarelor sau receptoarelor radio $P \geq 1$). Cele P segmente de ghid care sînt conetate la porturi au celelalte capete conectate într-o rețea de interconectare liniară și învariantă în timp cu un număr total de Q porturi ($Q \geq P$). La fiecare port al rețelei de interconectare care nu este totodată și port al structurii radiante se consideră că există cîte o terminație generalizată compusă dintr-un generator ideal de tensiune imprimată $\underline{V}_{Gq}(\omega)$ și o impedanță serie de valoare cunoscută $\underline{Z}_{Gq}(\omega)$. Figura 13 arată schema echivalentă a sistemului echipament-antena descris.

Echipamente Radio Definite prin Program si Virtuale

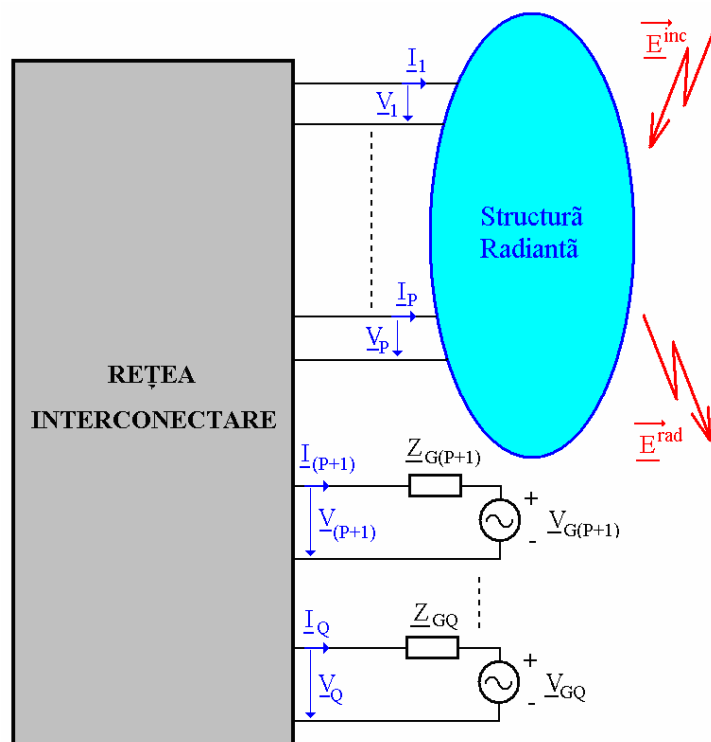


Figura 13

BIBLIOGRAFIE

- [1] – DEX on line, <http://dexonline.ro/>
- [2] - <http://www.atis.org/glossary/definition.aspx?id=1520>
- [3] – Recomandare ITU-R V.573-4
- [4] – David M. Kerns, “Definitions of v, I, Z, Y, a, b , and S ”, P.I.E.E.E. vol. 55, nr. 6, 1967
- [5] – Constantine A. Balanis, “Advanced Engineering Electromagnetics”, John Wiley & Sons, 1989, ISBN 0-471-62194-3
- [6] – X. L. Zhou, “On Independence, Completeness of Maxwell’s Equations and Uniqueness Theorems in Electromagnetics”, Progress In Electromagnetics Research, PIER 64, 117 – 134, 2006
- [7] – Roger F. Harrington, “Field Computation by Moment Method”, Macmillan Company, 1968