RAPPORT 1063

PRÉVISION ET LIMITATION DU RAYONNEMENT SECONDAIRE EN RADIODIFFUSION B.hm

(Question 44/10, Programme d'études 44G/10)

(1986)

1. Introduction

1.1 *Rayonnement secondaire*

Lorsque le champ rayonné par une installation d'émission de radiodiffusion est intercepté par une structure métallique, des courants sont induits dans cette structure et rayonnent un second champ qui s'ajoute vectoriellement au premier. Ce phénomène est connu sous le nom de rayonnement secondaire.

1.2 *Structures génératrices de rayonnement secondaire*

La radiodiffusion sonore en ondes hectométriques fait intervenir généralement des éléments rayonnants verticaux, habituellement isolés à la base, situés sur un réseau de terre constitué de nombreux câbles radiaux. Des structures métalliques verticales de grande hauteur (environ 15% ou plus de la longueur d'onde), dans le voisinage de ces antennes d'émission, peuvent créer des problèmes de rayonnement secondaire. Au nombre des structures types, on peut citer les pylônes, les tours, les grandes cheminées ou les complexes de l'industrie lourde. Les bâtiments élevés peuvent également être des sources gênantes. Toutefois, le risque le plus répandu de rayonnement secondaire provient des lignes d'alimentation à haute tension qui utilisent des pylônes d'acier. Il est courant, sur ces lignes, de fixer à chaque pylône un ou deux «fils aériens», parallèles aux conducteurs et placés au-dessus de ceux-ci, de manière à fournir une protection contre la foudre et à disperser tout courant destructeur engendré par un coup de foudre ou par une défaillance des conducteurs. Les pylônes et les fils aériens, ainsi que leurs images optiques par rapport au sol, forment des boucles qui tendent à résonner sur une fréquence située dans la partie inférieure de la bande B.hm et sur son deuxième harmonique situé dans la partie supérieure. Les conducteurs eux-mêmes ont peu d'effet sur le rayonnement secondaire.

1.3 *Résultats de l'étude*

Environ 75% des stations à ondes hectométriques au Canada utilisent des réseaux d'antennes directives.

Une étude entreprise en 1976 a montré que 28% des stations concernées avaient eu des problèmes de rayonnement secondaire et que 25% s'attendaient à de tels problèmes. Les pylônes d'acier supportant les lignes d'alimentation en énergie électrique étaient les principales causes de préjudice; les mâts, les bâtiments élevés, les cheminées et les complexes industriels étaient également mentionnés. Les frais engagés pour y remédier variaient entre 1000 et 500 000 dollars et, dans trois cas, le site d'émission a dû être abandonné. Une station qui prévoyait des problèmes avec un nouveau réseau d'antennes a dû prendre des mesures qui ont entraîné les dépenses suivantes: un consultant en radiodiffusion: 5 jours; personnel de station: 30 jours; ingénieurs d'installations électriques: 6 jours; pylônistes et poseurs de lignes: 40 jours [DOC, 1985].

2. Méthodes de prévision

On peut prévoir l'étendue des problèmes de rayonnement secondaire par des méthodes analytiques, des essais sur maquette ou des mesures en grandeur réelle.

2.1 *Méthodes analytiques*

Le Numerical Electromagnetics Code (NEC), mis au point aux Lawrence Livermore Laboratories en 1979 [Burke et autres, 1979], constitue une méthode précise qui offre une bonne corrélation avec les essais sur maquette et en grandeur réelle.

Il s'agit d'une méthode d'analyse instantanée où tous les conducteurs de courant principaux sont divisés en fractions de 0,1 longueur d'onde ou moins, représentés par des conducteurs individuels de diamètre approprié ou par des plaques de dimension appropriée. Le programme continue à régler les courants et les phases entre des limites prédéterminées dans chacune de ces fractions jusqu'à ce que les lois de l'électromagnétisme soient satisfaites. Le NEC est un puissant outil de travail, mais il présente l'inconvénient de nécessiter un ordinateur puissant, et il est coûteux en raison du temps nécessaire pour le passage en machine et pour l'analyse.

Le programme Richmond [Richmond, 1974a et b] constitue une autre approche pour la méthode d'analyse instantanée. Il apparaît toutefois que le NEC a davantage d'applications; il a été utilisé pour analyser le rayonnement secondaire de pylônes, de bâtiments et de lignes d'énergie.

En appliquant la théorie de la ligne de transmission, on peut mettre au point des programmes d'ordinateur beaucoup moins complexes pour l'analyse des lignes d'énergie: un de ces programmes, utilisé par une compagnie de distribution d'électricité – Ontario Hydro – met en évidence des distorsions de diagramme d'antenne

semblables à celles des méthodes instantanées, mais avec un rayonnement secondaire, dont les crêtes de résonance sont divisées par environ 1,8. Un autre programme assez simple pour pouvoir passer sur un mini-ordinateur et appelé AMPL, est recommandé pour l'analyse initiale des lignes d'énergie dans le rapport canadien [DOC, 1985]. Le programme figure dans ledit rapport. L'accord avec les méthodes instantanées est bon jusqu'à 1100 kHz, mais moins bon dans la partie supérieure de la bande hectométrique.

2.2 *Essais sur maquette*

On a réalisé au Canada des maquettes d'antenne d'émission et d'objets générateurs de rayonnement secondaire, généralement à l'échelle du 200e ou du 600e, en utilisant des bancs d'essai radioélectriques et une chambre sourde. Sur le banc d'essai, les maquettes sont placées sur une table tournante à surface conductrice et les mesures sont effectuées au bord de l'écran de cette surface. Dans la chambre sourde, on n'utilise pas d'écran de mise à la terre et les maquettes sont faites au double de leur hauteur normale de façon à englober leurs images optiques par rapport à la terre.

2.3 *Essais en grandeur réelle*

De nombreux essais sur le terrain étaient des essais «avant et après» sur des lignes d'énergie nouvellement installées; le diagramme de rayonnement de radiodiffusion était mesuré avec un soin tout particulier avant et après la construction des lignes, et de nouveau après application des procédures appropriées de désaccord de fréquence. D'autres essais ont porté sur l'installation temporaire d'un émetteur de faible puissance près de bâtiments isolés ou près de sections d'essai isolées sur des lignes d'énergie. Les détails figurent dans le rapport canadien [DOC, 1985].

3. Procédures d'évaluation

Lorsque l'on prévoit la construction d'un nouvel émetteur de radiodiffusion ou que l'on soupçonne un risque de rayonnement secondaire, il est suggéré de procéder à une évaluation préliminaire des effets possibles, suivie des mesures de correction indiquées selon le cas.

3.1 *Lignes d'énergie*

Une évaluation préliminaire utilisant le programme AMPL donnera une indication de la gravité du problème. Elle pourrait être suivie, en cas de besoin, par une analyse NEC et des procédures appropriées pourraient être proposées. Une station canadienne ayant un diagramme directif assez critique s'est trouvée confrontée aux problèmes posés par la construction de deux lignes d'énergie dans son voisinage. Les projections informatiques par la méthode instantanée ont indiqué dans quels pylônes circuleraient des courants élevés de rayonnement secondaire et ont montré que ce rayonnement serait en fait excessif. Après la construction des lignes, la présence d'un rayonnement secondaire intolérable a été confirmée par des mesures de champ. On a procédé alors à l'isolation des conducteurs aériens des pylônes qui causaient le plus de perturbations et le rayonnement secondaire est revenu à des niveaux acceptables.

3.2 *Mâts et pylônes*

En utilisant le calcul par la méthode instantanée, le Communications Research Centre a établi des graphiques de la «section transversale de diffusion» (σ/λ^2) pour un ensemble représentatif de mâts ou de pylônes; ces graphiques permettent d'évaluer rapidement l'amplitude, mais non la phase, de la composante de rayonnement secondaire dans un champ [Royer, 1985] (voir la Fig. 1).

En un point p situé à une distance d:

$$|E| = |E_p| \pm |E_s|$$

où:

E_s : champ de diffusion et

E_p : champ normal.

On peut déterminer E_s, en ayant lu la valeur de σ/λ^2 sur la courbe et connaissant le champ incident sur le diffuseur, E_{s0}, en appliquant la formule:

$$\sigma = 4\pi\, d_p^2 \left| \frac{E_s}{E_{s0}} \right|$$

On peut déterminer $|E|$ pour n'importe quel angle horizontal ou vertical en utilisant l'analyse de la méthode instantanée. Royer donne une grande famille de courbes à cette fin. Si la valeur du champ soulève des difficultés, des mesures correctives appropriées peuvent être prises.

3.3 *Bâtiments élevés*

Les travaux de Royer au Communications Research Centre (voir le § 3.2) comprenaient également des prévisions pour un ensemble représentatif de bâtiments, modélisés sous la forme de réseaux de conducteurs. Un exemple en est donné à la Fig. 2. On peut utiliser des techniques semblables à celles mentionnées au § 3.2.

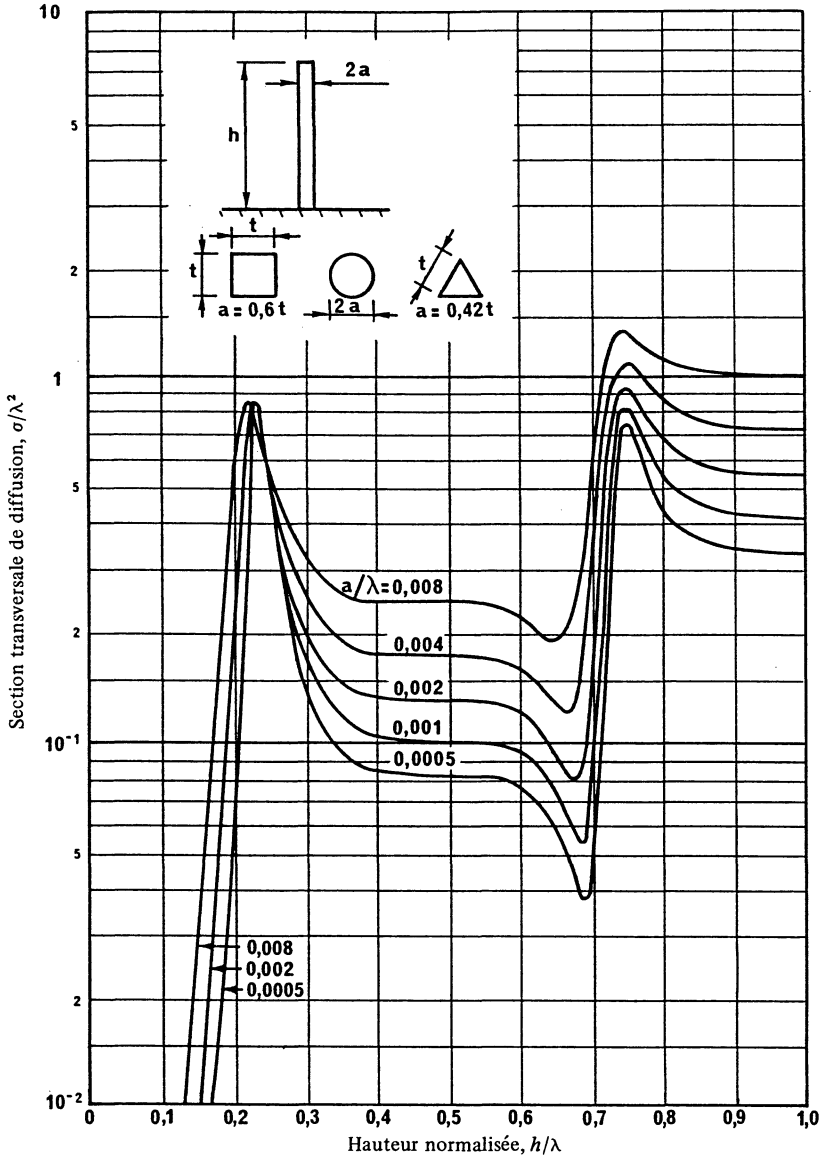

FIGURE 1 – *Section transversale de diffusion pour un ensemble représentatif de mâts et de pylônes*

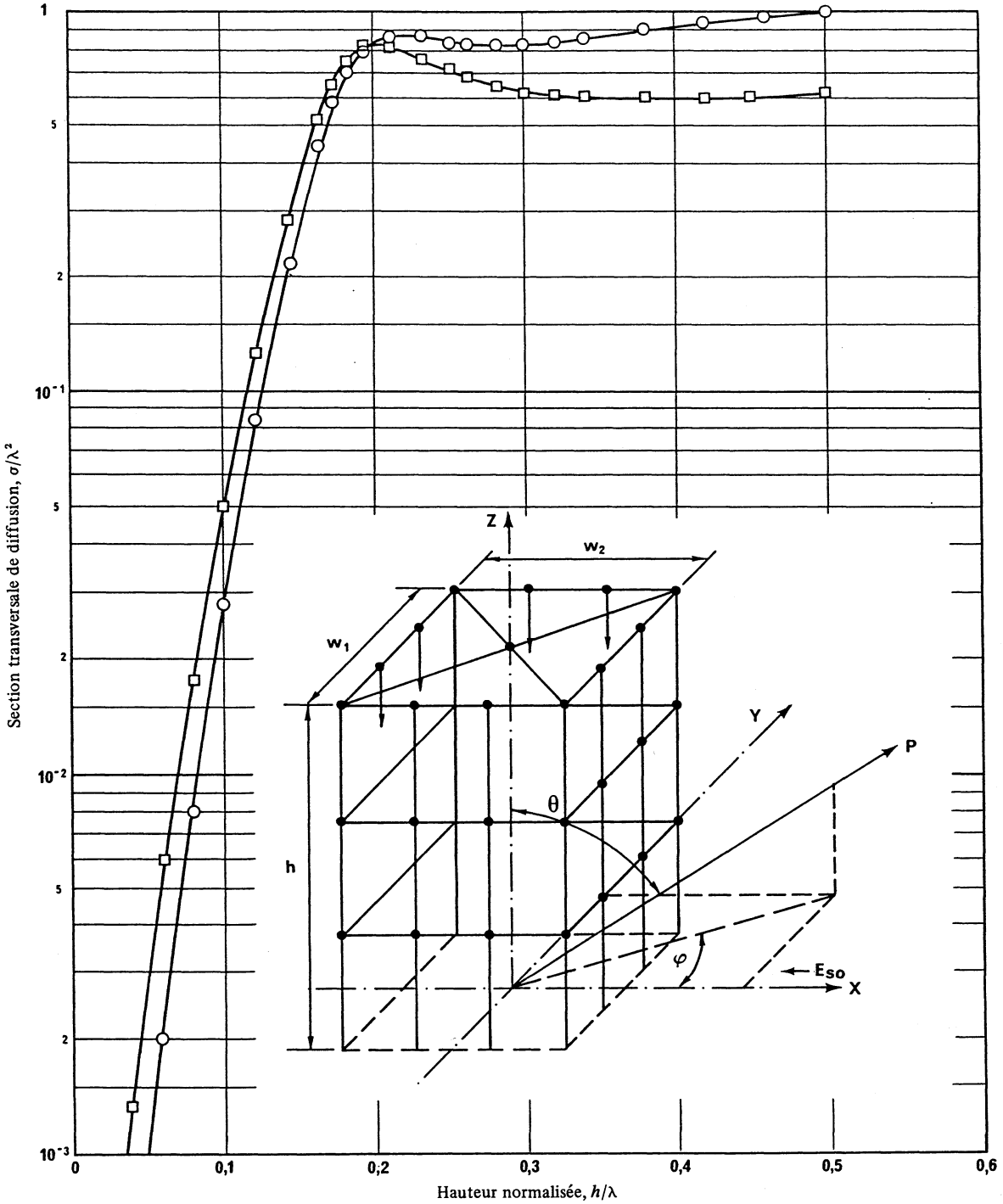

FIGURE 2 – *Section transversale de diffusion pour un ensemble représentatif de bâtiments, modélisés sous la forme de réseaux de conducteurs*

□: $\varphi = 0°$

○: $\varphi = 180°$

$w_1 / \lambda = w_2 / \lambda = 0{,}200$

a_0 (rayon du conducteur) / λ = 0,0016

ARCHIVES U.I.T. GENÈVE

4. Techniques de désaccord de fréquence

4.1 *Isolation des fils aériens*

Lorsque les lignes d'énergie créent un problème, une technique couramment employée consiste à installer des isolateurs entre les pylônes et le conducteur aérien, en des points qui sont normalement mis à la terre. Cela réduit la circulation du courant dans les boucles adjacentes. Cette méthode doit être utilisée judicieusement étant donné qu'elle crée des risques supplémentaires en cas de foudre ou de circulation de courant induit par une défaillance et qu'elle peut aussi causer une résonance sur une autre fréquence, affectant ainsi une autre station dans la région.

4.2 *Adaptateurs courts*

Lorsqu'une structure ou une boucle est résonnante, il se crée des ondes stationnaires de courant et de tension. Le remède le plus efficace consisterait à introduire un isolateur au point de circulation du courant maximal, mais dans la plupart des cas cette solution est irréalisable. Un adaptateur quart d'onde ouvert peut introduire une impédance élevée en ce point et il est normalement utilisé à cet effet. Malheureusement, sur les lignes d'énergie, le courant maximal sur le conducteur aérien se situe généralement à une certaine distance du pylône. Un adaptateur court ou un isolateur inséré en ce point est très efficace, mais cette solution n'a pas la faveur des autorités responsables de la distribution du courant électrique, qui ne veulent pas d'installations étrangères sur leurs conducteurs. Les adaptateurs courts sont également difficiles à installer ou à régler en ces emplacements. C'est pourquoi, une pratique normale a consisté à connecter les adaptateurs aux pieds du pylône, juste au-dessous des conducteurs d'énergie, en les suspendant à environ 1 m, parallèlement au pylône et en les terminant sur le pylône à environ 5 m au-dessus du sol par une réactance accordée. Etant donné que la longueur de ces adaptateurs est toujours inférieure à un quart de longueur d'onde, on utilise un condensateur réglable. Celui-ci est accordé pour réduire à un minimum le courant à la base du pylône.

On a mis au point un adaptateur de pylône appelé «adaptateur en coude» [DOC, 1985]. Il part de la tour, juste au-dessous des conducteurs d'énergie, mais il est haubané au pylône de façon à former un angle droit à mi-hauteur, puis revient au pylône près du sol, où les composantes d'accord peuvent être réglées. On a constaté que les adaptateurs en coude pour deux fréquences sont très efficaces lorsqu'ils sont montés sur des coins orthogonalement opposés du pylône. Il a été également prouvé que les adaptateurs en coude ont une largeur de bande plus grande que les adaptateurs parallèles aux pieds du pylône.

4.3 *Bâtiments*

Les prévisions sur maquette et les prévisions analytiques du rayonnement secondaire des bâtiments sont assez concordantes et se prêtent aux techniques de désaccord de fréquence. Toutefois, la valeur de l'impédance à la base est incertaine et les matériaux, tels que le béton, utilisés dans la construction introduisent des pertes; cela donne des résultats quelque peu anormaux quand on applique les méthodes de désaccord de fréquence en grandeur réelle.

Le désaccord peut être fourni par des adaptateurs courts du genre de ceux qui sont utilisés sur les pylônes, mais les adaptateurs ne sont généralement pas acceptables du point de vue esthétique. Un autre système d'adaptateur peut être installé sur toit et implanté à 3 ou 4 m au-dessus de la périphérie du bâtiment. On le connecte par une réactance appropriée au système de protection contre la foudre. On peut obtenir un adaptateur sur toit amélioré en montant un parapluie muni de quelques conducteurs au-dessus du toit et en connectant leur point commun d'une manière semblable à celle décrite ci-dessus.

Lors de mesures en grandeur réelle faites au Canada, on a constaté que le désaccord de fréquence calculé pour fournir une réduction d'environ 18 dB, a donné une amélioration de l'ordre de 4 à 5 dB seulement. Comme expliqué plus haut, cela tient au fait que la structure introduit des pertes. Un complément d'étude est nécessaire.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

BURKE, G. J., POGGIO, A. J., LOGAN, J. C. et ROCKWAY, J. W. [juin 1979] NEC-numerical electromagnetics code for antennas and scattering. Proc. IEEE International Symposium on Antennas and Propagation, Seattle, WA, Etats-Unis d'Amérique, Vol. 1, 147-150.

DOC [1985] Final Report of the working group on re-radiation problems in AM broadcasting. Dept. of Communications (DOC), Ottawa, Ontario, Canada.

RICHMOND, J. H. [mai 1974a] Radiation and scattering by thin-wire structures in the complex frequency domain. NASA Contractor Report CR-2396. NASA, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.

RICHMOND, J. H. [juin 1974b] Computer program for thin-wire structures in a homogeneous conducting medium. NASA Contractor Report CR-2399. NASA, Washington, DC, Etats-Unis d'Amérique.

ROYER, G. M. [mars 1985] The distortion of AM broadcast antenna patterns as caused by nearby towers and high-rise buildings. CRC Report No. 1379. Communications Research Centre, Dept. of Communications, Ottawa, Ontario, Canada.

BIBLIOGRAPHIE

ALFORD, A. [décembre 1977] Re-radiation from tall guyed towers located in a strong field of a directional AM radio station. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-23, **4**, 97-106.

KAVANAGH, S. J. et BALMAIN, K. G. [mars 1984] High-rise building re-radiation and detuning at MF. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-30, **1**, 8-16.

SAWADA, Y. et NAKAMURA, H. [1963] Development of a new wave trap by parallel sub-conductors. *Electron. and Telecomm. in Japan*, Vol. 8, **1/2**, 70-77.

SILVA, M. M., BALMAIN, K. G. et FORD, E. T. [septembre 1982] Effects of power line re-radiation on the patterns of a dual-frequency MF antenna. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-28, **3**, 94-103.

TILSTON, M. A. et BALMAIN, K. G. [septembre 1983] Medium frequency re-radiation from an unstrung steel power line tower. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-29, **3**, 93-100.

TILSTON, M. A. et BALMAIN, K. G. [mars 1984a] Medium frequency re-radiation from a steel tower power line with and without a detuner. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-30, **1**, 17-26.

TILSTON, M. A. et BALMAIN, K. G. [juin 1984b] A microcomputer program for predicting AM broadcast re-radiation from steel tower power lines. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-30, **2**, 50-56.

TRUEMAN, C. W. et KUBINA, S. J. [juin 1981] Numerical computation of the re-radiation from power lines at MF frequencies. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-27, **2**, 39-45.

TRUEMAN, C.W., KUBINA, S. J. et BELROSE, J. S. [août 1983] Corrective measures for minimizing the interaction of power lines with MF broadcast antennas. *IEEE Trans. Electromag. Compt.*, Vol. EMC-25, **3**, 329-338.

TRUEMAN, C. W., KUBINA, S. J., MADGE, R. C. et JONES, D. E. [septembre 1984] Comparison of computed RF current flow on a power line with full scale measurements. *IEEE Trans. Broadcasting*, Vol. BC-30, **3**, 97-107.