

ショートノート

歩行者のある地下街の電波伝搬特性

正員 山口 芳雄[†] 准員 二瓶 要[†]
 正員 阿部 武雄[†] 正員 関口 利男^{††}

Radio Propagation Characteristics in Underground Street Crowded with Pedestrians

Yoshio YAMAGUCHI[†], Member, Kaname NIHEI[†], Associate Member, Takeo ABE[†] and Toshio SEKIGUCHI^{††}, Members

[†]新潟大学工学部情報工学科, 新潟市

Faculty of Engineering, Niigata University, Niigata-shi, 950-21 Japan

^{††}東京工業高等専門学校, 八王子市

Tokyo National Technical College, Hachioji-shi, 193 Japan

あらまし 本文は、人の通行のある地下街において VHF 帯から X バンドまでの電波伝搬実験を行い、その結果を示すと共に、人の伝搬特性に与える影響などを損失誘電体モデルを用いて解析したものである。

1. まえがき

中空のトンネル^{(1)~(5)}、坑道⁽⁶⁾、地下街⁽⁷⁾などにおける中空の導波路内の電波伝搬については今までに移動通信などの観点から数多くの研究が行われてきた。しかし、内部に自動車、人など、電波の伝搬にとって障害物がある場合の伝搬特性の研究は実際の実験的検討の一例⁽³⁾を除いて他にはあまり行われていないように思われる。これは、障害物の影響を考慮して理論的に伝搬特性を評価することが難しいためである。筆者らは、新潟市の地下街において昼間、商店が開いており、人の通行がある場合、すなわち日常の状態で VHF 帯から X バンドまでの電波伝搬特性を測定する機会を得た。そしてその実測結果から、中空の状態よりも伝搬損は増加するが⁽⁷⁾、人のいる高さの範囲で電界強度が強くなるという傾向が認められた。そのため、人のいる空間をわずかな損失をもつ誘電体層に置き換え、人のいる地下街を損失誘電体の平行平板導波路でモデル化して伝搬特性を計算した結果、伝搬定数や断面内の

電界強度分布が実測値と比較的よく一致したので報告する。

2. 実験

1986 年 10 月に電波伝搬の実験を行った。測定場所は新潟市にある地下街西堀ローサで、長さ 330 m、幅 6.4 m、高さ 3 m の直線状通路の脇に奥行 6 m の商店が連なっている。図 1 にその構造を示す。天井や側壁面には看板や照明器具など平均で約 30 cm 程度の突起物が数多くある。この通路は日中 (8 時~22 時) 常に人の通行が有り、その密度は約 3 人/10 m 程度であった。

電波伝搬実験では送信アンテナを地下街の一端、断面の中央 (高さ 1.5 m) におき、掃引発振器で適当な周波数帯の掃引電波を励振する。受信側には地下街に沿う各地点 (1.1 m の距離間隔) でスペクトルアナライザを用いてその周波数帯の電界レベルを測り、それをパーソナルコンピュータで記録した。図 2 にその測定装置のブロック図を示す。測定周波数は 200 MHz~12.4 GHz、送受信アンテナは、周波数帯に応じて 7 種類の方角ホーンと八木ダイポールアレーを用い、垂直偏波となるよう設置した。距離方向の測定では、受信アンテナを床から 1 m (人のいる領域, Ant. 1) と 2 m (人のいない領域, Ant. 2) の 2 箇所に設置し、同軸スイッチで切換えて受信した。そして、人の密度の変化による伝搬特性の変動も調べる意味で同じ測定を時間帯を変えて 2 回行った。

伝搬特性の実測例を図 3 に示す。図の電界強度はスペクトルアナライザの受信レベルを直接表示したものである。図の中に引かれている直線はその距離区間内の電界強度を最小 2 乗法によって求めた回帰直線であり、その傾きが減衰定数を表している。図 3(a) で 2 本の回帰直線のうち、上が Ant. 1、下が Ant. 2 によって得られたものであり、伝搬距離に対する減衰の割合は等しいが、人のいる領域での受信レベルの方が少し強

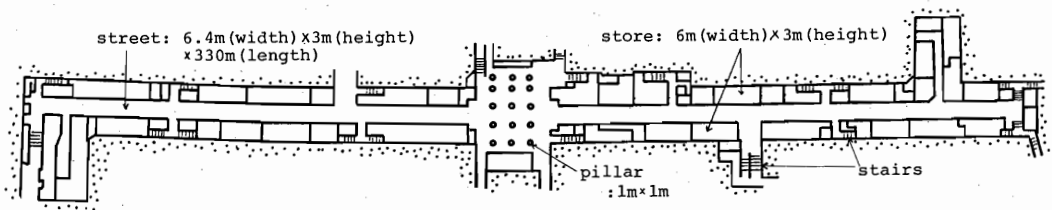


図 1 実験に用いた地下街の平面図

Fig.1 Plane view of the underground street under the experiment.

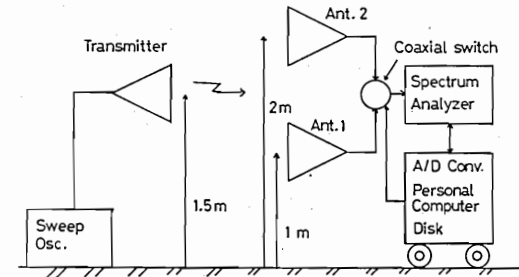
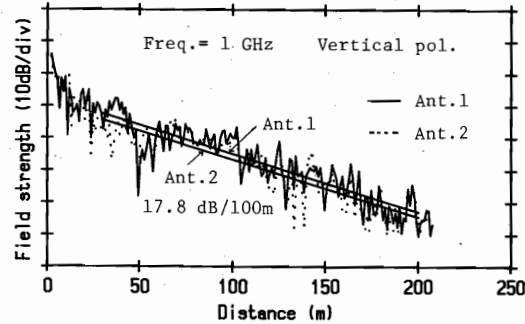
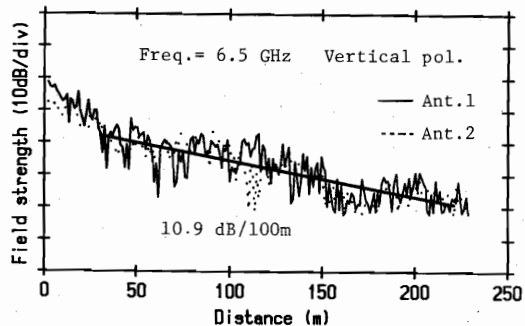


図2 測定装置のブロック図

Fig.2 Block diagram for the measuring apparatus.



(a) Freq. = 1 GHz



(b) Freq. = 6.5 GHz

図3 地下街に沿う電界強度の実測例

Fig.3 Examples of received field intensity along the underground street.

くなっていることが分る。図3(b)では、回帰直線はほぼ重なっている。

また、通行人のいる地下街においてどのようなモードで電波が伝搬しているかを確かめる意味で、送信点から十分離れた位置(約50m)での断面内強度分布を測定した。図4に周波数500MHzにおける断面中央の高さ方向の電界分布と次章の理論による計算結果を示す。この図からも人のいる領域での受信レベルの方が強くなっていることが分る。なお、この図と同様な

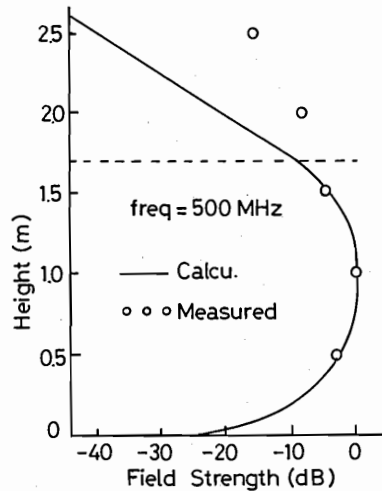


図4 断面内の電界分布

Fig.4 Field distribution in the cross section.

分布が5~6GHz以下の周波数帯で見られた。

3. 理論

実験で得られた断面内の電界分布、および使用した波長に比べて地下街の幅は十分大きいということから、人のいる地下街を図5のような誘電体の平行平板導波路でモデル化し、伝搬特性を検討してみる。このモデル化は人のいる地下街を天井領域、人の高さよりも上の空間領域、人のいる領域、床領域のみを考慮した近似で、人の影響をわずかな損失を持つ誘電体層に置き換えたものである。地下街の中の突起物や側面の凹凸を考慮に入れていない。各領域の媒質定数を図5のように定める。

例えば垂直偏波で伝搬するモードに着目すれば、各領域で磁界の x 成分 H_x は次のように表すことができる。但し、共通因子 $\exp[j(\omega t - k_z z)]$ は省略している。

領域III ($y > a + b$)

$$H_{x3} = A \exp[-jk_{y3}(y - a - b)] \quad (1)$$

領域0 ($a + b > y > b$)

$$H_{x0} = B \cos[k_{y0}(y - b)] + C \sin[k_{y0}(y - b)] \quad (2)$$

領域I ($a > y > 0$)

$$H_{x1} = D \cos(k_{y1}y) + E \sin(k_{y1}y) \quad (3)$$

領域II ($0 > y$)

$$H_{x2} = F \exp(jk_{y2}y) \quad (4)$$

但し、 $A \sim F$ は未定振幅定数。

$$k_i^2 = \epsilon_{ri}^* k_0^2 - k_{zi}^2 = k_0^2 - k_{zi}^2 \quad (5)$$

$$\epsilon_{ri}^* = \epsilon_{ri} - j\sigma_i/\omega\epsilon_0 \quad (i=1, 2, 3) \quad (6)$$

k_0 : 自由空間波数, k_z : 平行平板導波路の伝搬定数

ϵ_{ri} : 比誘電率, σ_i : 導電率

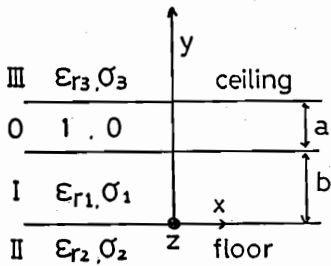


図5 平行平板導波路
Fig.5 Parallel plate waveguide.

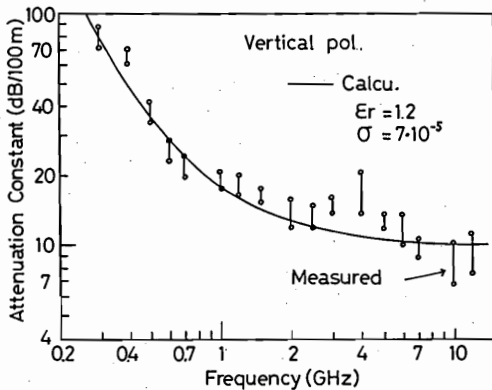


図6 減衰定数の周波数特性
Fig.6 Frequency characteristics of the attenuation constant.

境界条件からこの構造に対する波数の固有値方程式が次のように導かれる。そして、この固有値から伝搬定数、および断面内の電磁界強度分布が得られる。

$$\left[p \tan p - j \frac{k_{y2} a}{\epsilon_{r3}^*} \right] \left[1 + j k_{y2} b \frac{\epsilon_{r1}^* \tan q}{\epsilon_{r2}^* q} \right] + \frac{a}{b} \left[\frac{q}{\epsilon_{r1}^*} \tan q - j \frac{k_{y2} b}{\epsilon_{r2}^*} \right] \left[1 + j \frac{k_{y2} a}{\epsilon_{r3}^*} \frac{\tan p}{p} \right] = 0$$

$$p = k_{y0} a, q = k_{y1} b \quad (7)$$

4. 比較検討

固有値方程式を Muller 法で解き、伝搬定数を求めた。図6に減衰定数の周波数特性を示した。計算値は人のいる領域の高さ $b = 1.7 \text{ m}$ 、比誘電率 1.2、導電率 $7 \cdot 10^{-5} \text{ S/m}$ 、とし天井、床の比誘電率 5、導電率 0.1 S/

m としたものである。また、図6における実測値は、図3の距離に対する電界強度の変化を各測定周波数ごとに最小2乗法で求めた値である。

同じパラメータで断面内高さ方向の電界分布を求めた結果を図4に示した。これらの図から分かるように計算値は実測結果とよく一致しており、ここでのモデル化が有効であることを意味している。

5. むすび

人のいる領域を誘電体層に置き換え、地下街の電波伝搬特性を平行平板導波路でモデル化し解析した結果は実測値と一致しているので、ここで用いたモデル化は単純ではあるが導波路内の障害物の影響を考慮する際、一つの有力な方法と思われる。

謝辞 この実験を進めるうえで御協力頂いた新潟地下開発(株)防災センター長、山本友一氏に感謝します。また、本研究の一部は文部省科学研究費(課題番号: 61750295)によって行われた。

文 献

- (1) A. G. Emslie and R. L. Lagrace: "Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels", IEEE Trans. Antennas & Propag., **AP-23**, 2, pp.192-205 (March 1975).
- (2) J. Chiba, T. Inaba, Y. Kuwamoto, O. Banno, and R. Sato: "Radio communication in tunnels", IEEE Trans. Microwave Theory & Tech., **MTT-26**, 6, pp.439-443 (June 1978).
- (3) 小園, 鈴木, 花沢: "方形断面トンネル内における電波伝搬特性の実験的検討", 信学論(B), **J62-B**, 6, pp.565-572 (昭54-06).
- (4) 山口, 阿部, 関口: "トンネル内の基本モードの伝搬特性", 信学論(B), **J65-B**, 4, pp.471-476 (昭57-04).
- (5) K. Yasumoto and H. Shigematsu: "Analysis of propagation characteristics of radio waves in tunnels using a surface impedance approximation", Radio Sci., **19**, 2, pp.597-602 (1984).
- (6) 鈴木, 井清, 小久江, 吉富, 青木: "碓井試験炭鉱坑道における極超短波(UHF)の伝搬" 信学技報, **EMCJ82-17** (1982).
- (7) Y. Yamaguchi, T. Abe and T. Sekiguchi: "Experimental study of radio propagation characteristics in an underground street and corridors", IEEE Trans. EMC-28, 3, pp.148-155 (Aug. 1986).

(昭和62年3月23日受付, 6月3日再受付)