石膏ボードを用いた電波吸収体による無線LAN使用環境改善に関する検討

祥雲 勇一*, 大場 琴子*, 鈴木 宏和**, 渡邊 慎也*, 橋本 修*

Improvement of Wireless LAN Communication Environment Used by Wave Absorbers Using Plaster Boards

Yuichi SAKUMO*, Kotoko OHBA*, Hirokazu SUZUKI**, Shinya WATANABE* and Osamu HASHIMOTO*

* 青山学院大学大学院理工学研究科 (〒229-8558 神奈川県相模原市淵野辺5-10-1)

** 株式会社熊谷組技術研究所 (〒300-2651 茨城県つくば市鬼ヶ窪1043)

*Department of Electrical Engineering and Electronics, Aoyama Gakuin University (5-10-1 Fuchinobe, Sagami-hara-shi, Kanagawa 229-8558)

**Technical Laboratory, Kumagai Gumi Corporation (1043 Onigakubo, Tsukuba-shi, Ibaraki 300-2651)

Abstract

This paper reports the design of a wave absorber composed of plaster board, a common building material, and conductive paper, for IEEE 802.11b/g (2.45 GHz) and IEEE 802.11a (5.2 GHz) wireless LANs. A plaster board of standard thickness was selected for this design and the resistance of the conductive paper was changed; the total thickness is 50 mm and the resistance is $194 \Omega/\square$. The wave absorber was fabricated based on the design, and its absorption characteristics were measured. Furthermore, an installation test of this absorber was conducted in a shielded room and improvement of speech quality was observed. Thus, we have shown that a wave absorber for two frequencies commonly used in wireless LANs can be realized.

Key Words: Plaster Board, Conductive Paper, Wave Absorber for Dual-frequency, Installation Effectiveness

1. はじめに

無線通信技術が急速に進展した昨今では、一般家庭やオフィスのみならず、空港や地下鉄構内のホットスポット設置に至るまで、無線LANの利用が非常にポピュラーなものとなった。また、100 Mbps 超の無線通信を実現する次世代無線規格(IEEE 802.11n)の導入も進められ、便利で快適な無線LAN環境が整備されている現状にある。これに伴い、安定した無線LAN環境を構築するために、特に室内においては壁面に電波吸収体を設置することや^{1)~4)}、電波吸収機能を付加したパーティション⁵⁾を利用することによってマルチパス伝搬を低減させる方法がとられている。このような状況下、現在の室内環境では、無線LAN規格としてIEEE 802.11a (5.2 GHz 帯、室内での利用のみ)およびIEEE 802.11b/g (2.4 GHz 帯)に準拠した通信機器が主に使用されているが、同室内で両規格の通信を使用する場合には、それぞれの周波数に対してではなく2周波数に対応した電波吸収体が必要不可欠となる。

そこで本研究では、室内壁に利用され、かつ高い耐火性能を有する石膏ボードに着目し、抵抗皮膜との多層構造とした2周波対応の電波吸収体を提案し、伝送線理論による設計および設計結果に基づいて製作したサンプルを用いて実験的な特性評価を行った。また、シールドルーム内に本

吸収体を施工した際の検証実験も行い、通信品質の評価からその設置効果を検討した。

2. 電波吸収体の設計

2.1 吸収体の構成

本研究では、2周波数に対応するためFig. 1に示すような3層構成とし、金属板側の石膏ボード層を1層目(厚み: d_1)、その前面の抵抗膜を2層目、電波入射側の石膏ボード層を3層目(厚み: d_3)とし、検討を行った。ここで構成材料には、スペーサとして強度を有し広く建物に普及して

Fig. 1 Composition of wave absorber

いる石膏ボードを用い、抵抗膜としては紙に導電性塗料を塗布した導電紙を用いた⁶⁾。なお石膏ボードは、汎用性の観点からJIS規格の厚み(9.5, 12.5, 15, 21 mm)を選択した。また、その誘電率は自由空間透過法で周波数4~6 GHzにおいて測定された複素比誘電率(2.40-j0.00)とした^{7,8)}。

2.2 設計

Fig. 1に示した電波吸収体の構成を、Fig. 2のような電気的等価回路に置き換える。この等価回路において、伝送線理論により1-1'端側から金属板側を見込んだ入力インピーダンス $\dot{Z}_{in}$ は次式により計算することができる⁹⁾。

$$\dot{Z}_{in} = \dot{Z}_3 \frac{\dot{Z}_{in2} + \dot{Z}_3 \tanh \dot{\gamma}_3 d_3}{\dot{Z}_3 + \dot{Z}_{in2} \tanh \dot{\gamma}_3 d_3} \quad (1)$$

ここで、

$$\dot{Z}_{in1} = \dot{Z}_1 \tanh \dot{\gamma}_1 d_1$$

$$\dot{Z}_{in2} = \frac{\dot{Z}_2 \dot{Z}_{in1}}{\dot{Z}_2 + \dot{Z}_{in1}}$$

$$\dot{Z}_1 = \frac{Z_0}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{r1}}}$$

$$\dot{Z}_3 = \frac{Z_0}{\sqrt{\dot{\epsilon}_{r3}}}$$

とする。なお、 λ は波長[m]、 $\dot{\epsilon}_{r1}$, $\dot{\gamma}_1 \{ (=j(2\pi/\lambda)\sqrt{\dot{\epsilon}_{r1}}) \}$ は金属板から1層目の誘電率および伝搬定数であり、 $\dot{\epsilon}_{r3}$, $\dot{\gamma}_3 \{ (=j(2\pi/\lambda)\sqrt{\dot{\epsilon}_{r3}}) \}$ は3層目の誘電率および伝搬定数である。これらの式により、1-1'端から内部を見込んだ入力インピーダンス $\dot{Z}_{in}$ および自由空間の特性インピーダンス $\dot{Z}_0$ を用いて、吸収量を以下の式⁹⁾から求める。

$$S[\text{dB}] = -20 \log \left| \frac{\dot{Z}_{in} - Z_0}{\dot{Z}_{in} + Z_0} \right| \quad (2)$$

以上に述べた設計法から、石膏ボードと導電紙を用いて吸収体の設計を行う。なお、2.45 GHzおよび5.2 GHzの両周波数において20 dB以上の吸収量を目標値と定めた。また、石膏ボードの厚みは、室内壁面へ施工することを想定して、前述したJIS規格の厚み(9.5, 12.5, 15, 21 mm)の組み合わせとした。設計では、導電紙の面抵抗値を制御できる範囲を考

Fig. 2 Electrical equivalent circuit

慮して100~500 $\Omega/\square$ で変化させ、垂直入射時における最大の吸収量が得られる厚みの組み合わせについて検討した。

Fig. 3に、厚みを50 mmとした場合（以後、50 mmタイプと称す）における吸収量の等値線を示す。この等値線は一例として吸収量10 dB, 15 dB, 20 dBの線を示している。このチャートを用いると横軸が周波数および縦軸が面抵抗値を表していることから、それぞれの組み合わせに対して吸収量が算出できる。

これより、50 mmタイプでは20 dB以上の吸収量が所望の周波数において得られることを理論的に確認した。なお、Table 1に50 mmタイプの設計諸元をまとめておく。

以上の設計諸元をもとに、50 mmタイプにおいて周波数特性を計算した。Fig. 4に、その結果を示す。これより、50 mmタイプについては、2.45 GHzにおいて32.7 dB, 5.2 GHzにおいて23.8 dBの吸収量がそれぞれ得られ、2周波数において20 dB以上の吸収量が得られることがわかった。

Fig. 3 Design chart of wave absorber (50 mm type)

Table 1. Designed data of wave absorber

Composition	Composition of layer		
	Thickness d_1 [mm]	Resistive surface R [$\Omega/\square$]	Thickness d_3 [mm]
50 mm type	25.0 (12.5×2)	185	25.0 (12.5×2)

Fig. 4 Calculated result of absorption

3. 吸収量の測定

3.1 測定系

以上の設計結果をもとに、実際に電波吸収体サンプルを製作し、吸収特性を実験的に検討する。本測定では六面電波暗室内で送受信ホーンアンテナ(SCHWARZBECK BBHA 9120LF)とベクトルネットワークアナライザ(Agilent E8362B)から構成される測定系を展開し、反射電力法により実施した⁹⁾。その測定系をFig. 6に示す。アンテナとサンプル支持台の距離は3.0mとし、周波数帯域は2.0~6.0 GHzとした。また、Fig. 5には吸収体サンプルの概観を示し、Table 2にはサンプルの構成諸元をまとめた。50 mm タイプについては、12.5 mm 厚の石膏ボード4枚を使用することで構成している。なお、サイズは48 cm 角であり、Table 3中に示した厚みの実測値は各サンプルにおいて異なる位置計9ポイントの平均であり、その各々の厚みにおいて標準偏差も合わせて記載した。

Fig. 5 Wave absorber sample

Fig. 6 Block diagram of measurement (Top view)

3.2 周波数特性の測定結果

50 mm タイプにおける、垂直入射に対する吸収量の周波数特性測定結果をFig. 7に示す。なお、図中には理論設計値もあわせて記載した。この結果、50 mm タイプによる測定結果をみると、設計値と比較して吸収量のピーク値に差異が生じたものの、同等の傾向が得られることを確認した。また、所望の両周波数において18~25 dB程度の吸収量が得られることを実験的に明らかとした。

4. 設置効果の検証

次に、本電波吸収体の設置効果を検証する。本電波吸収体は所望の両周波数において18~25 dB程度の吸収量が得られ、壁面に設置した時、十分に反射波を抑制できる効果が期待できる。これに伴い、シールドルーム壁面に吸収体を設置した際の電磁界環境について検討した。具体的には、無線LAN IP携帯電話およびアクセスポイントをシールドルーム内に配置し、吸収体配置時および非配置時における音声品質測定を行い、パケット数により通信環境の変化を検証した。なお、パケットロスとはアクセスポイントとIP電話間でデータのやり取りを行う際、通信品質の劣化を示

Table 2. Data of fabricated sample (50 mm type)

Each value	Composition of layer		
	Plaster board (d_1)	Conductive paper	Plaster board (d_3)
Thickness [mm]	25.41 (12.72+12.69)	0.05	25.37 (12.70+12.67)
ϵ_r, R	2.40-j0.00	188 $\Omega/\square$	2.40-j0.00

Table 3. Data of plaster board

Layer	Thickness [mm]	Standard deviation
First-layer	12.72	0.019
	12.69	0.032
Third-layer	12.70	0.018
	12.67	0.016

Fig. 7 Measured result of wave absorber (50 mm type)

す指標であり、通信品質が劣化した際は、パケットを再送してデータを回復している。すなわち、データ通信を行う際、パケット数の増加は電磁環境の劣化を示し、パケット数の減少は電磁環境の改善を意味する¹⁰⁾。Fig. 8およびFig. 9に測定系を示す。測定では、まずSIP (Session Initiation Protocol) サーバによりそれぞれの端末にIPの割り振りを行い、無線LANコントローラで各端末のアクセスポイントの制御を行う。そして給電可能なスイッチングハブを介して固定電話機およびアクセスポイントに通じ、固定電話機および無線LAN IP携帯電話を用いた通話が可能となる。なお、50 mm タイプはIEEE 802.11a (5.2 GHz帯) およびIEEE 802.11b/g (2.4 GHz帯) に対応した吸収体であるが、設置効果の検証は一例としてIEEE802.11b (2.4~2.5 GHzの4ch)

Fig. 8 Measurement system about installation effect of wave absorber

Fig. 9 Measurement condition

の通信方式で行った。また、本シールドルームの大きさは縦、横それぞれ2025 mm、高さ2400 mmである。測定では、高さ800 mmの位置でシールドルーム内の壁面より L だけ離れた地点にアクセスポイントを設置し、反対の壁面より距離 d だけ離れた地点に無線LAN IP携帯電話を設置したものである。なお、それぞれの機器を設置した場所はシールドルームの中心線上である。そして、50 mmタイプを2面配置した場合および配置していない場合に関して音声品質測定を行い、単位時間当たりのパケット数の変化を比較した。また、同時に自由空間における理想的なパケット数の測定も併せて行った。なお、今回の測定においては $L=150$ mm, $d=250, 300, 350$ mmと設定した。

測定結果をTable 4に示す。上段が自由空間の場合におけるパケット数の実測値、中段が吸収体非配置時の場合、下段がシールドルーム内部2面に吸収体を配置した場合の結果である。これらより、吸収体非配置時の場合はシールドルーム内部において、電波が多重反射することにより通信品質が劣化し、パケット数が増加していることがわかった。さらに、それぞれの距離 d においても、そのパケット数の増加は自由空間の場合と比較すると16.3~40.0%と大きく変化している。これらの理由は、シールドルーム内部において多重反射波により定在波が生じ、通信が困難な場所が現れたためであり、さらに距離 d においてその定在波が変化し、通信困難な場所が変化したことが理由である¹¹⁾。

これに対し内部に電波吸収体を配置した場合には、多重反射が抑制されパケット数は理想的な値である自由空間の場合に近い値となり、パケットロスも3%以下と非常に低く、内部の通信環境が安定していることがわかった。以上の結果から、石膏ボード型電波吸収体をシールドルーム内に配置することで、安定した通信環境が提供可能であることが明らかになった。

5. まとめ

本研究では無線LANの使用環境改善を目的とし、2周波数同時対応型の電波吸収体を提案し、伝送線理論による設計からサンプル試作実験を通じて実現性を検討した。得られた結果を下記にまとめる。

- (1) JIS規格に基づいた石膏ボードの厚みを数種類想定し、制御できる抵抗値の厚みを考慮して所望の周波数帯において20 dB以上の吸収量が得られる構成を

Table 4. Measured result of communication quality in the shield room

	Packet [packets/s]			Packet loss [%]		
	$d=250$ mm	$d=300$ mm	$d=350$ mm	$d=250$ mm	$d=300$ mm	$d=350$ mm
Free space	210	210	210	0	0	0
No Absorber	344	251	253	40.0	16.3	17.0
Absorber	214	211	212	1.9	0.5	1.0

理論的に設計した。その結果、50 mm タイプの構成とすることで、両周波数において20 dB以上の吸収量が得られることを理論的に確認した。また、設計結果に基づいて電波吸収体サンプルを製作し、実験的に特性評価を行った結果、設計値と測定値の傾向はほぼ一致し、良好な吸収量が得られることを確認した。

- (2) 本吸収体をシールドルームの壁面に配置し、通信品質の評価から設置効果を実験的に検討した結果、電波吸収体を配置した場合、パケット数は理想的な値である自由空間の場合に近い値をとり、パケットロスも3%以下と非常に低く、安定した通信環境が構築できることを確認した。

以上の結果より、2周波数同時対応型電波吸収体の実現性および設置効果を理論的かつ実験的に明らかにすることができた。

(2008.3.19-受理)

文 献

- 1) 遠藤哲夫, 花澤理宏, 橋本 修: “印刷シートを用いた $\lambda/4$ 型電波吸収石膏ボードに関する基礎検討”, 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. **J86-B**, No. 7, pp. 1249–1250, 2003.7
- 2) K. Kimura and O. Hashimoto: “An Experimental Study on the Calculation of the Complex Permittivity for Building Materials from the Reflection Loss by Free Space Measurement”, 電気学会論文誌(C), Vol. **124**, No. 2, pp. 381–387, 2004.2
- 3) 木村健一, 橋本 修: “無線LAN通信環境における建材型電波吸収体の設置効果に関する実験的検討”, 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. **J88-B**, No. 1, pp. 310–318, 2005.1
- 4) 木村健一, 久保知也, 橋本 修: “内装用一般建材を用いた三層型電波吸収体の基礎的検討”, 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. **J88-B**, No. 6, pp. 1130–1138, 2005.6
- 5) 近藤明日香, 松本好太, 橋本 修, 中里寿考: “無線LANに対応したパーティションタイプ電波吸収体に関する基礎的検討”, 電子情報通信学会論文誌(C), Vol. **J88-C**, No. 12, pp. 1121–1129, 2005.12
- 6) 大塚健二郎, 橋本 修, 織田 満, 守田幸信: “マイクロ波帯における導電紙を用いた $\lambda/4$ 型電波吸収体に関する基礎的検討”, 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. **J83-B**, No. 7, pp. 1043–1049, 2000.7
- 7) 橋本 修, 佐藤篤樹, 花澤理宏, 谷 健祐, 遠藤哲夫: “C帯における自由空間透過法による複素比誘電率測定に関する研究”, 電子情報通信学会論文誌(B), Vol. **J86-B**, No. 7, pp. 1089–1095, 2003.7
- 8) 橋本 修: “高周波領域における材料定数測定法”, 森北出版, 2003
- 9) 橋本 修: “電波吸収体のはなし” 日刊工業新聞社, 2001
- 10) 野尻秀樹, 山本 豊: “インターネット電話の品質分析法”, 電子情報通信学会総合大会講演論文集通信(2), p. 232, 1998.3
- 11) 大場琴子, 平岡 遼, 松本好太, 原川健一, 橋本 修: “電波吸収フィルムを用いた金属箱内の電界分布に関する実験的検討”, 信学総大, Vol. 2007年_通信 No. 1, p. 317, 2007.8