

論文の内容の要旨

論文題目 **High-Speed and Reliable Indoor Communication System by
Two-Dimensional Communication Tile**
(二次元通信タイルによる高速・高信頼な屋内通信システム)

氏 名 岡田 明正

1. はじめに

近年、屋内空間の高機能化が求められている。高速無線通信だけでなく、環境情報の取得による安全管理や通信端末位置に応じた情報の提示といった機能が例として挙げられる。また、工場等における無線通信による設備の制御もその一つである。これらを実現するためには、多くの通信端末が存在しても通信品質を維持し、他ネットワークとの耐干渉性のある通信環境が必要となる。

上記課題の解決のために、本論文では、超広帯域無線(UWB)を二次元通信[1]で活用する方式[2]に着目した。二次元通信は、電磁波をシート上の導波路内に伝搬させ、近接場を利用する通信方式で、外部への電磁波の放射がないため、耐干渉性が高く、送信出力が非常に弱く制限されている UWB でも安定した通信を可能にする。しかし、現状では机程度の大きさでしか実現されておらず、屋内通信技術としては制限がある。

本論文では、二次元通信を屋内通信技術として確立することを目的とし、通信エリアの拡大手法を提案する。また、高速かつ高信頼な通信が可能であることを示すために、物理層プロトコルの設計に必要な二次元通信の伝搬モデルの確立と通信特性の評価を行い、シート状通信媒体からの放射の抑制方法についても提案を行う。

2. 二次元通信エリアの拡大手法

2-1 二次元通信タイル

二次元通信可能な領域を柔軟に構成するために、二次元通信タイルと呼ぶ通信ユニットの連結により通信領域を拡大する方式を提案する。図 1 に本方式の概念図を示す。二次元通信タイルは、側面に非接触型のコネクタを備え、同じ構成のタイルを並べるだけで、タイル間の接続ができ、通信エリアを拡大できる。

本タイルは図 1 (b)のように表面層、二次元通信シート、ベース層の 3 層で構成される。表面層は、実装個所に応じて選定され、床に配置する場合はカーペットタイルとなる。タイルの大き

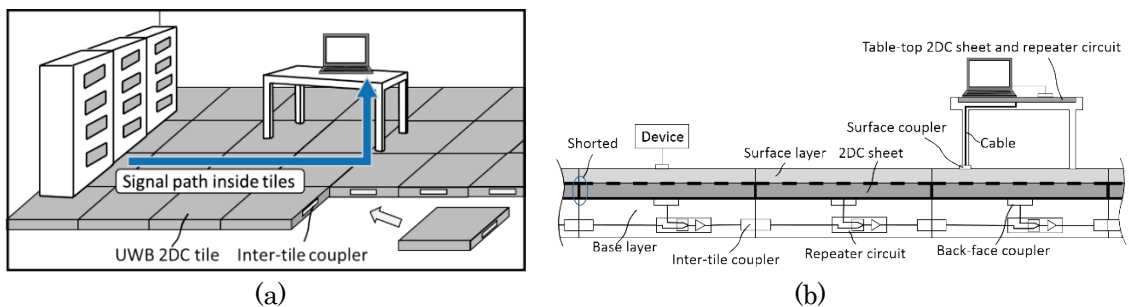


図 1 二次元通信タイル概念図 (a) 全体像 (b) 断面図

さに制限はないが、標準的なカーペットサイズの 50 cm が適当だと考えられる。通信媒体である二次元通信シートは、隣接のシートと結合を行わないように端面は金属箔で覆われる。シート内では定在波が発生するため、SN 比を高めることが可能となる。ベース層は、タイル間の信号の送受信を行っており、伝搬損失を補うための補償回路[3]と、この回路と通信シートや隣接のタイルと接続するための近接結合用カプラ[4]が備えられる。

2-2 実現可能性の検証

本システムが UWB 帯、特にハイバンドと呼ばれる 7.25 GHz-10.25 GHz において、通信が可能であることを検証した。評価は、50 cm 四方の 1 枚の二次元通信シートで、シート上に置かれたカプラとシート端の入力端子間の透過係数をネットワークアナライザで測定した。

シート上の 6 点における透過係数の結果を 10 dB ごとに集計し、測定点数に対する割合を求めたところ、どの場所でも 90%以上の帯域で透過係数が -40 dB 以上であり、これは SN 比で 20 dB 以上に相当し、高い品質での通信が可能であることが分かった。また、シートの中心におけるシートとカプラの間の誘電体の厚さを変化させた時の送信電力に対する受信電力の比を実験から求めた。その結果、厚さ 10 mm までは、SN 比を 20 dB 以上確保して通信でき、商用のカーペットの厚さ程度でも、十分通信できる SN 比が得られることが分かった。

以上のことから、二次元通信タイル方式は、UWB ハイバンドの広い帯域で、高い SN 比の通信が可能であることが分かった。

3. 伝搬モデルと通信特性

変調方式や一秒間の変調回数であるシンボルレートといった物理層プロトコルの設計または既存通信プロトコルの適合の判断のためには、伝搬する空間の特性、特に有意な遅延時間を示す遅延広がりや SN 比の特性の知見が必要である。本章では、伝搬モデルおよび実験から、二次元通信タイルの特性を明らかにする。

3-1 単一通信シートでの通信特性

通信タイルシステムで用いられるタイルは同一の構成であり、その中に組み込まれる通信シートの形状も同一である。そのため、図 2 のように仮想シートを並べていくことで、通信シート内での反射の経路を求めることができ、シート内での伝搬モデルを構築できる。

50 cm 四方のシートにおける遅延広がり値の累積分布関数を、実測値、シミュレーションおよび図 2 を元にした伝搬モデルに関して求めた。実測の場合は、厚さ 6mm のカーペット越しに測定した。実測においては、8 割の測定点で 5.76 ns 以下で、モデルでは、10ns という結果になった。UWB のチャンネルモデル[5]と比較すると、同等かやや短い値である。

実測結果をもとにした UWB ハイバンドの帯域幅に対する一定の SN 比を確保できる帯域幅の比の累積分布関数を求めたところ、ほぼ全てのシート上で 20 dB 以上の SN 比を 8 割の帯域幅で確保できることが分かった。

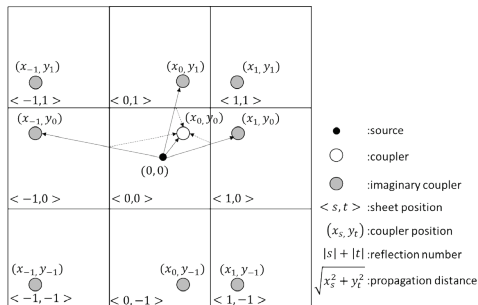


図 2 1 枚のタイル内での信号伝搬経路同定手法

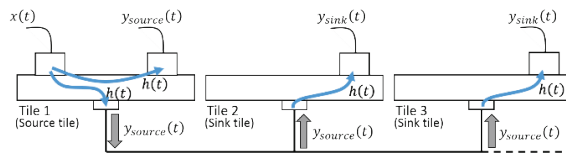


図 3 複数枚のタイルが接続されたシステムでの信号伝搬モデル

3-2 システム全体での通信特性

本システムは、複数のタイルを接続してシステム構築する。信号の伝達経路は図3のように、次の3種類にモデル化できる。(1)送信端末から、同一タイルに置かれている受信端末。(2)ベース層につながるカプラ(背面カプラ)から、隣接のタイルの背面カプラ。(3)背面カプラから、そのタイルに置かれた受信端末である。

同一タイルの2点間のインパルス応答は場所によらず等しく、反射波が存在する環境のため指数関数状に減衰すると仮定し、また入力信号を理想的なインパルスと仮定すると、送信端末が配置されたタイルの遅延広がり値 σ_{source} とそれ以外のタイルの遅延広がり値 σ_{sink} の間には

$$\sigma_{source} \sim 1.4\sigma_{sink} \quad (3)$$

の関係があることが分かった。実測からも(3)式に近い関係が得られることを確認した。これより、一枚のタイルでの遅延広がりから、複数枚のタイルが接続されたシステム全体での遅延広がりを見積もることが可能であることが分かる。

以上から、物理層設計に必要な通信特性が明らかになった。また、遅延広がり値はシステムの大さきによらず、多くて14ns程度であり、これは屋内の無線通信で想定される値より小さいため、シンボルレートを最適化することでより高速な通信が可能となる。

4. 放射抑制手法

二次元通信シートは、無限長のシートであれば、遠方場への放射は発生しない。しかし、実際には有限長のため、放射が発生する。本システムでは複数の通信シートを用いるため、放射の抑制を行うことが、通信の信頼性を高めるために必要である。

有限長の二次元通信シートによる遠方場への放射モデル[6]に基づき、観測点が通信シートよりも十分遠いと仮定すると、エバネッセント場の電界成分を $E(x) = w(x)e^{-jk_s x}$ とすると、遠方場での磁界は次のようにかける。

$$H_y(\theta) = \alpha \frac{1}{\sqrt{r'}} \int_{-\frac{L}{2}}^{\frac{L}{2}} w(x) e^{-j(k_s - k_0 \cos \theta)x} dx \quad (5)$$

ただし、 α は比例定数、 L はシート長、 k_0 は真空中の波数を表している。 θ は、シートの信号の進行方向からの角度であり、 r' はシート中心からの距離であり、 k_s はシート内の波数を表している。

(5)式は、 $k = k_s - k_0 \cos \theta$ とすると、 x と k に関する窓関数 $w(x)$ のフーリエ変換と解釈できる。ただし、シート上で観測できる範囲は、 $k_s - k_0 \leq k \leq k_s + k_0$ となる。従って、波数空間で上記の範囲で強度が減少するように $w(x)$ を変化させることで、放射を抑制できることが分かる。

図4は、 $w(x)$ をシート端付近で変化させた時の、観測できる波数に対応した角度に関する $W(k) = \mathcal{F}(w(x))$ の強度の分布を示す。1つは直線状のテーパであり、もう一つは余弦関数状である。シート長は500mm、テーパ長は37.5mm、周波数は8GHzという設定で計算を行った。どちらの場合でも、 $w(x)$ が一定の従来の構成に比べると、観測範囲全体にわたって強度は弱くなっていることが分かる。角度に関して、強度を合計した放射量に相当する値は、直線状の分布では11dB、余弦関数状の分布では7dB減衰されることになる。

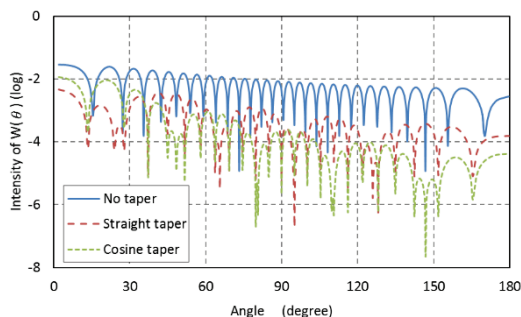


図4 理論モデルによる電界分布と遠方での磁界強度の関係

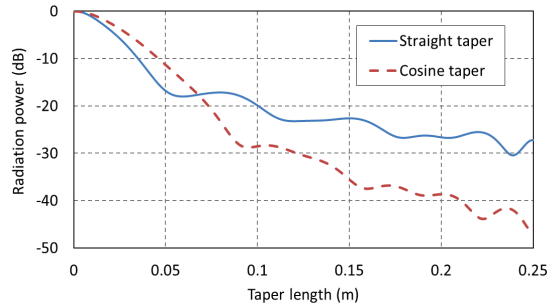


図5 電界のテーパ区間の長さとの放射電力の関係

図 5 は、テーパ長を変化させた場合の放射量の変化を示している。テーパが長いほど抑制効果が高くなることが分かる。余弦関数状のテーパで 10 cm の時で 30 dB となる。

以上から、電界の振幅分布を変化させることでシートからの放射が減少し、通信システムの耐干渉性を高めることができることが分かった。

5. まとめ

本論文では、二次元通信を屋内通信技術として確立するために、二次元通信タイル方式を提案した。本方式では、タイル状の通信ユニットを非接触で連結させることで通信エリアを拡大することができる。また、空中の電磁波の影響を受けづらいため、UWB の広帯域幅を活かして、現在課題となっている帯域不足による通信速度や信頼性の低下を解決することが可能である。

通信タイル上では、ほぼ全ての場所で 20 dB 以上の SN 比を UWB ハイバンドの 8 割の帯域幅で確保できることが分かった。また、シート内伝搬モデルから、通信シートの遅延広がり多くて 14 ns であり、この値はシステムのサイズによらず一定であることが分かった。これらの通信特性の知見より物理層プロトコルの設計が可能となる。また、通信シートからの放射抑制手法を提案した。放射の抑制のためには電界の振幅分布を変化させればよく、10 cm 程度の変化区間で余弦関数状にシート端で変化させれば 8GHz で 30 dB 程度の抑制効果があることが分かった。以上の結果から、二次元通信を高速かつ高信頼な通信を行える屋内通信技術として実現できることを明らかにした。

参考文献

- [1] H. Shinoda, Y. Makino, N. Yamahira, and H. Itai, "Surface Sensor Network Using Inductive Signals Transmission Layer," in *Proc. 4th Int. Conf. Networked Sensing Syst.*, 2007, pp. 201-206.
- [2] Y. Kudo, A. Noda, and H. Shinoda, "UWB Sensor Network on 2-D Waveguide Sheet," in *Proc. IEEE Sensors Applications Symp.*, 2014, pp. 339-342.
- [3] A. Noda, and H. Shinoda, "Active Tile for Room-Size UWB 2-D Communication," in *Proc. IEEE/SICE Int. Symp. System Integration*, 2015, pp. 668-671.
- [4] Y. Masuda, A. Noda, and H. Shinoda, "Contactless Coupler for 2D Communication Tile Connection", in *Proc. SICE Annu Conf. 2015*, 2015, pp. 522-527.
- [5] A. A. M. Saleh, and R. A. Valenzuela, "A Statistical Model for Indoor Multipath Propagation," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. SAC-5, no. 2, pp. 128-137, Feb. 1987.
- [6] A. Noda, A. Okada, and H. Shinoda, "Radiation from surface of two-dimensional communication sheet," *IEICE Communication Express*, vol. 5, no. 5, pp. 135-141, May 2016.