

プリント回路とモジュール回路間におけるスロットを用いた

無線伝送方式に関する研究

戸花照雄¹，関口昌幸²，磯田陽次¹¹ 秋田県立大学 システム科学技術学部 知能メカトロニクス学科² 秋田県立大学大学院 システム科学技術研究科 共同ライフサイクルデザイン工学専攻

近年、情報処理技術の進展にともない、各電子機器の情報処理量が大きくなり、それらを伝送する信号の高速化、大容量化が進んでいる。そして、伝送信号の高速化により、プリント回路のモジュール間の伝送のようなコネクタを用いる信号伝送においても、低損失の高周波信号接続が必要とされ、そのためより高度な整合技術が要求されると考えられる。この問題を解決するための方法として、基板のグラウンドに配置したスロットを用いた無線信号接続に着目し、無線信号伝送が可能となるグラウンドスロットの構造や寸法、基板材料について解析と測定により検討した。解析結果から誘電体損失を考慮しない場合には FR4 基板を用いることにより無線信号伝送が可能であるが、誘電体損失を考慮した場合には、低誘電体損失基板材料である Megtron-7 を用いることで低損失な無線信号伝送が可能になることを示した。また、1dB ほど損失が増加するが、測定により解析結果の妥当性を示した。

キーワード：無線信号伝送，電界結合，プリント回路基板，グラウンドスロット

はじめに

複雑な動作を行う電子回路は、多数のさまざまな機能を持つ LSI やモジュール回路から構成される場合が多い。例えば、パーソナルコンピュータにおいては、主要な IC チップが置かれたマザーボードに CPU チップやメモリチップがソケットを通して電氣的に接続され、LAN 用のインターフェイス、ビデオカードなどがコネクタを通して接続されている。多数の回路基板構造をもつ電子回路システムにおいて、それぞれのモジュール間にひずみや損失の少ない信号を伝送するためには、接続に用いられるコネクタが重要になる。さらに、信号の周波数が高くなるにつれて線路の不連続や特性インピーダンスの不連続による反射、別の伝送線路との不要電磁結合や銅損などの伝送損失が発生する。また、グラウンドに不要な電流が流れることにより不要電磁波放

射が起こる可能性がある。以上のような問題を避けるために、高周波においてはコネクタ部分における整合条件を満たすことが重要になる。今後、電子機器が高速になるにつれて伝送信号周波数の高周波化が進むことが考えられ、周波数が高くなるにつれて波長が短くなるために整合条件を満たすことは困難になる。将来的にはミリ波や、それよりも高周波であるテラヘルツ波が使われるようになると予想されることから、より高い周波数で使用できる接続方法を開発する必要がある。

これらの問題を解決するための一つの方法として、導体構造を使わない無線信号接続が考えられる。近年、回路や IC 内の信号を無線伝送するために結合インダクタや多重巻線コイルを用いた磁界結合方式が検討されている (Kuroda Lab., 2019)。しかしながら、これらの方法はインダクタを使うために高い周波数で適用することは困難である。そこで、申請

者は、グラウンドスロットによる電界結合を用いた方式を考えた。一般的にスロットをアンテナとして使用するときにはその長さを半波長とする必要があるが、ミリ波やテラヘルツ波のような高い周波数において、信号の波長は非常に短く、スロット構造を小形化することが可能であるため、次世代に使用される高周波信号伝送においては、小形高密度化が可能になると考えられる。ここで、高周波プリント回路において一般的に用いられるマイクロストリップ線路構造を考えた場合には、直下のグラウンドにスロットを形成することで信号を電磁波に容易に変換できると考えられる。さらにスロットの形状を直線ではなくコの字形状とすることにより、さらなる小形化が可能になる。

本研究においては、グラウンドスロットを通した無線信号伝送の基本的な特性を明らかにするために、図1に示すように、マイクロストリップ線路を構成する2つのプリント回路のグラウンドにコの字型のスロットを配置して、そのスロット間を電磁結合することにより2つの線路間を無線信号により接続する。そして、線路間の伝送特性を数値計算により解析する。このとき、スロットの寸法、基板間の距離などを様々に変化させて数値計算を行うことにより、最適な伝送効率を得るためのスロットの構造や、伝送可能な周波数帯域の関係を明らかにする。そして、数値計算の妥当性を示すために実際にプリント回路を作成してその伝送特性を測定することによりこれらの数値計算結果の妥当性を示しスロットによる無線信号接続の有効性を示す。

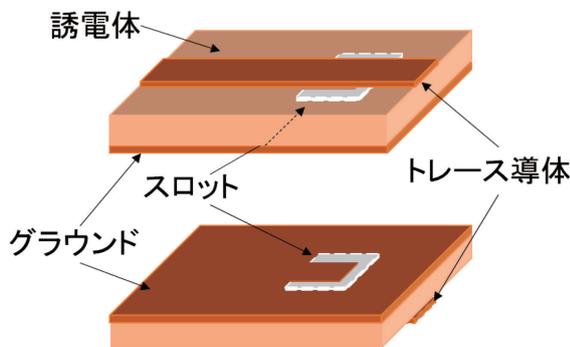


図1 コの字形状のスロットを用いた無線信号伝送

解析による最適なスロットの寸法の導出

マイクロストリップ線路を持つ2つの基板のグラウンドにコの字形スロットを配置して信号を無線伝送させ、その伝送特性を解析する。そして、スロットの寸法をさまざまに変化することにより適切な無線伝送可能な寸法を導出する。

解析モデル

解析モデルを図2に示す。幅 $W=40\text{mm}$ 、長さ $L=410\text{mm}$ 、厚さ $T=0.8\text{mm}$ のプリント回路基板の上面に配置した幅 W_L のトレース導体によりマイクロストリップ線路を構成する。トレース導体の片側の端部を給電点および終端点とし、もう一方の端部をショートビアにより短絡する。短絡部分に近接したグラウンドにトレースに対称になるようにコの字型のスロットを配置する。プリント基板の材料として

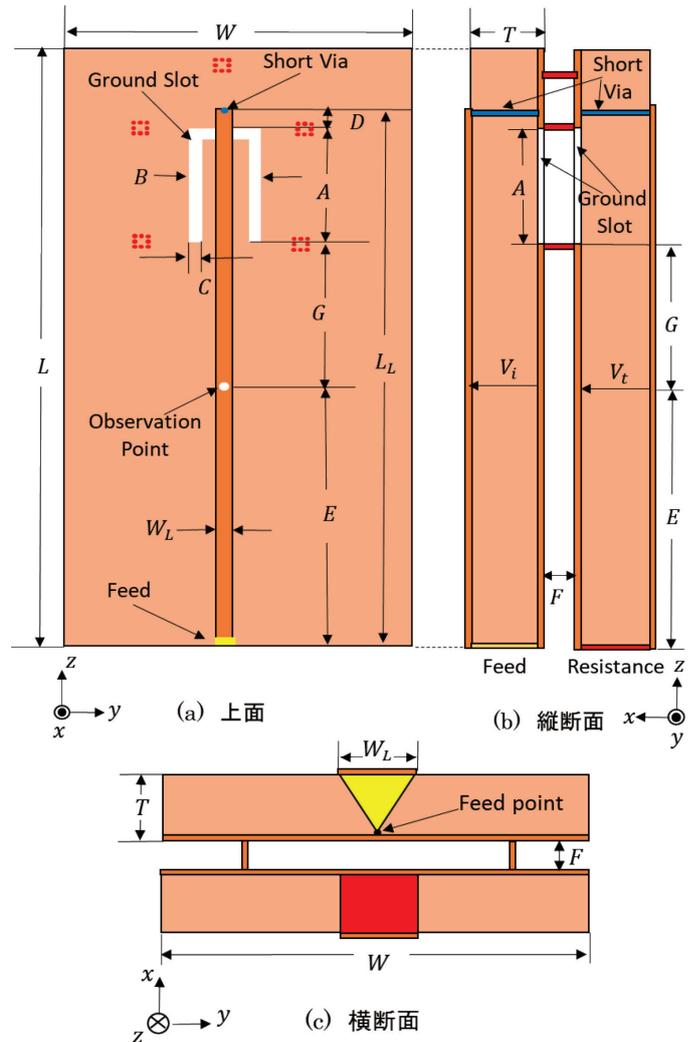


図2 解析モデル

安価に購入可能な FR4 材料（比誘電率 4.0）を用いた。ここで、誘電体損失は考慮しない。同じ構造の 2 枚のプリント回路をグラウンドスロットが対向するように配置し、図に示すようにグラウンドを接続する。

解析方法として有限差分時間領域法を用いた（宇野, 1998）。基板の端部にある給電点から電圧パルスを入射し一方の導体トレース上の点を通る電圧を入射電圧 V_i 、もう一方の点を通る電圧を伝達電圧 V_t とし、入射電圧により正規化した伝達電圧の周波数特性である S_{21} 特性を解析する。

解析結果

グラウンド間距離 F 、スロットの幅 C 、およびトレース導体の幅 W_L を変化したときのそれぞれにおいて S_{21} 特性を解析した。解析結果を図 3 (a)~(c) にそれぞれ示す。これらの図より、 $F=0.4\text{mm}$ のとき、 $C=0.4\text{mm}$ のとき、および $W_L=1.2\text{mm}$ のときに S_{21} 特性が 0dB に近づくこととなり、少ない損失で無線信号伝送が可能であることがわかる。また、ほかのパラメータについても適切に調整することにより図 4 に示す S_{21} 特性を得ることができた。図より、中心周波数は 4.17GHz であり、 S_{21} 特性が -0.5dB 以下となる周

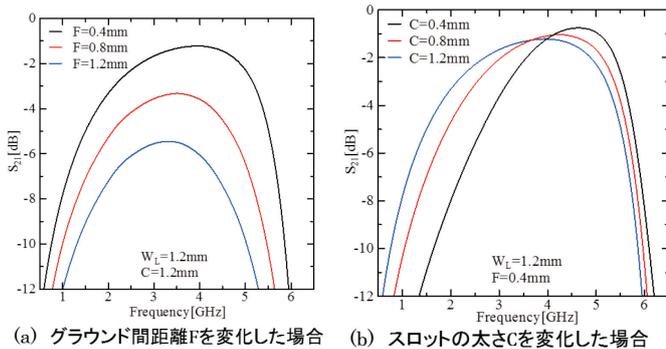


図3 解析結果 (FR4 基板)

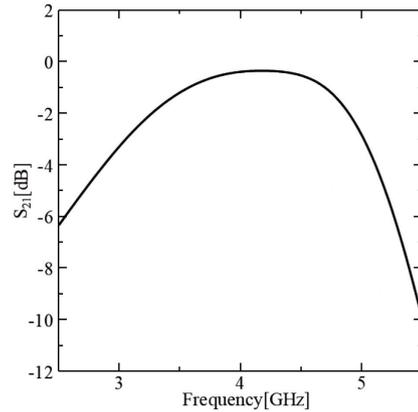


図4 導出した適切な無線伝送特性 (RF4 基板)

波数幅は 0.63GHz となった。

測定と解析結果の比較

実際の回路において信号の無線伝送が可能かどうかを確認するために、測定を行う。図 4 の解析で使用したパラメータを用いてプリント回路基板を製作した。製作したプリント回路を図 5 に示す。図 5 の 2 つのプリント回路に、スペーサーを介してねじ止めすることによりグラウンドスロットにおける 0.4mm の間隔を実現した。ベクトルネットワークアナライザ (keysight E5071C) を用いて S_{21} 特性を測定する。図 6 にベクトルネットワークアナライザを用いた測定構成を示す。ここで、測定における観測面を解析と同じ位置にするために、TRL 校正を用いた。図 7 に測定結果と解析結果を示す。ここで、図 4 に示した解析結果を黒の実線で、測定結果を赤の破線で示した。測定結果は解析結果に比較して 3dB 程度小さくなるのがわかる。この損失の原因は誘電体

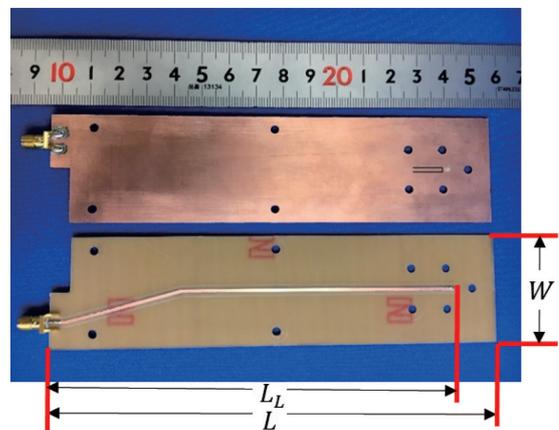


図5 製作したプリント回路基板 (RF4)

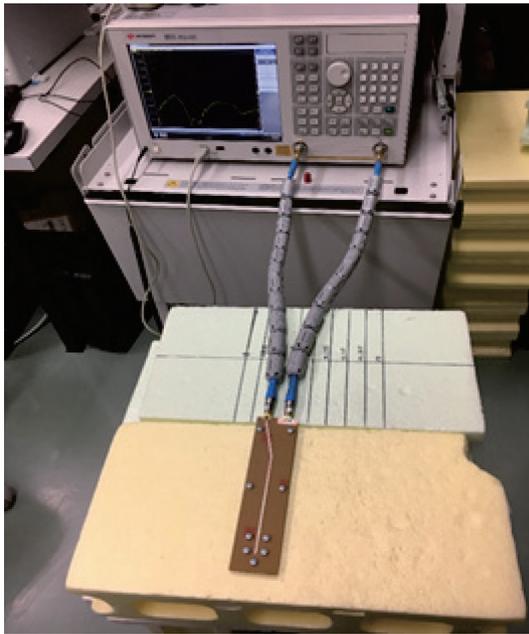


図6 ベクトルネットワークアナライザによる測定

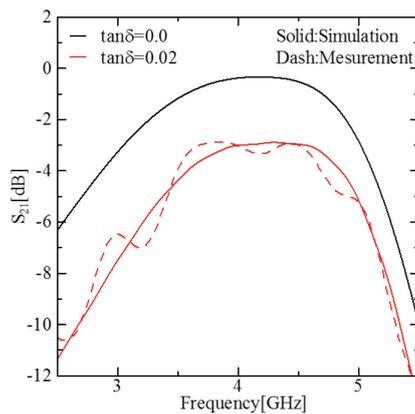


図7 測定結果と解析結果 (FR4)

損失であると考え、FR4における誘電正接 ($\tan \delta = 0.02$) を考慮して解析を行った。解析結果を赤の実線で図7に追加した。この、誘電体損失を考慮した結果は測定結果とほぼ等しい値となることから、FR4基板を用いたときには誘電体損失が大きいため、伝送損失が大きくなってしまふことがわかる。したがって、より高い伝送効率を実現するためには誘電体損失の小さな材料を検討する必要がある。

誘電体損失の小さな基板材料を用いた場合の特性

高周波で使用される誘電体損失が小さなプリント回路材料としてテフロン (中興化成工業), Megtron-

表1 基板材料の電気特性

	比誘電率	誘電正接
テフロン	2.2	0.0015
Megtron-7	3.4	0.002
FR4	4.0	0.02

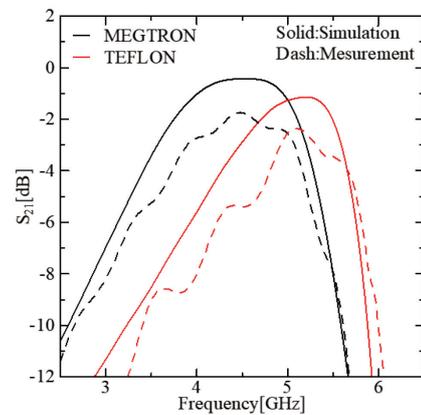


図8 低誘電体損失基板による無線伝送特性

7(Panasonic)がある。テフロンとMegtron-7の比誘電率と誘電正接の値を表1に示す。参考のためにFR4の特性も併せて示している。表1より、誘電正接はテフロンが最小となり、比誘電率も最小となることがわかる。これらの基板材料を用いてモデルを作成して S_{21} 特性の解析を行った。ここで、寸法はFR4と同じ寸法とした。また、実際にこの基板材料を用いてグラウンドスロットを装荷したプリント回路を製作して S_{21} 特性の測定を行った。結果を図8に示す。ここで、Megtron-7の結果は黒色で、テフロンの結果は赤色でそれぞれ示す。また、解析値は実線、測定値は破線でそれぞれ示した。

図より、Megtron-7の場合には、中心周波数はほぼ4.5GHzであり、測定においては、FR4の場合に比較してやや高い。また、テフロンの場合には、中心周波数はほぼ5.2GHzであり、ほかの基板材料に比較して高くなる。これは比誘電率の値が低いために、中心周波数が高くなると考えられる。

伝送損失については、Megtron-7を用いた結果はテフロンの場合より良い。また、Megtron-7の解析結果における S_{21} 特性の最大値は約-0.43dBであり、周波数帯域は0.42GHzとなり、誘電体損失を考慮しないFR4基板と同等の特性を得ることができた。しかしながら、測定結果は1.2dB程度小さく、測定値

における S_{21} 特性の最大値は約-1.7dB となった。この結果から、より正確に伝送損失を導出する場合には、導体損失など誘電体損以外の損失も考慮しなければならないことが考えられる。

まとめ

本研究においては、2枚のプリント回路間において高周波信号を接続する方法として、コの字形状のグラウンドスロットを用いた無線信号伝送方法について検討した。プリント基板材料として安価に購入できるFR4基板を用いて最適なグラウンドスロットの寸法を解析により導き出したが、誘電体損失が大きいため実際に低損失の接続を行うことは困難であると考えられる。そこで、より低損失な基板材料としてMegtron-7とテフロンについて検討し、解析と測定により、比誘電率が比較的大きなMegtron-7を用いたときに、解析においては良好な伝送特性の結果が得られた。しかしながら、まだ測定値が1dB程度小さなことから、実用化に向けてさらなる低損失伝送ができる構造などを検討する必要があると考えられる。

文献

- Kuroda Lab.(2019), 「非接触コネクタ TLC」,
<https://www.yokowo.co.jp/product/electronic/pl/spcex.html>.
- 宇野亨 (1998). 『FDTD 法による電磁界およびアンテナ解析』, コロナ社.

〔 2019年6月30日受付
2019年7月9日受理 〕

Study of Wireless Signal Transmission Through a Ground Slot Between Two Printed Circuit Boards

Teruo Tobana¹, Masayuki Sekiguchi², Yoji Isota¹

¹ *Department of Intelligent Mechatronics, Faculty of System Science and Technology, Akita Prefectural University*

² *Course of Joint in Life Cycle Design Engineering, Graduate School of Engineering Science and Technology, Akita Prefectural University*

Recently, progress in information processing technology has increased the capacity of each electronic device due to an increase in signal transmission speeds. However, to speed up transmission signals across a low-loss high-frequency connection between printed circuit modules with connectors, a more advanced matching technology is required. To solve this problem, we focused on a wireless signal connection using a slot installed in the ground of printed circuit board. We researched the structure and dimensions of the ground slot and the substrate material capable of connecting wireless signals through analysis and measurement. Although results indicated that wireless signal transmission is possible using the FR4 substrate without dielectric loss, we demonstrated that a low loss connection for wireless signal transmission was also possible using Megtron-7. We also demonstrated the validity of the analysis by taking measurements although 1dB loss increased according to our analysis results.

Keywords: Wireless Signal Transmission, Electric Field Coupling, Printed Circuit Board, Ground Slot